

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Геофизический центр  
Российской академии наук

## О Т Ч Е Т

О выполнении государственного задания  
на 2015 год

Москва

2016

GEOPHYSICAL CENTER  
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

REPORT  
OF GEOPHYSICAL CENTER OF RAS  
FOR 2015

Results of the State Task

Moscow  
2016



The present edition contains information about the work of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (GC RAS) in 2015. The full list of GC RAS employees' publications in 2015 is also included. The edition is intended for specialists in the field of geophysics and related geosciences.

**Authors:**

S. M. Agayan, O. V. Aleksanova, I. M. Alyoshin, E. V. Artyushkov, V. V. Aleksanov, A. A. Astapenkova, Yu. V. Barykina, Sh. R. Bogoutdinov, V. G. Bondur, P. B. Borodin, E. V. Vavilin, O. N. Vasilyeva, I. E. Vitvitskaya, A. D. Gvishiani, V. G. Getmanov, A. A. Grudnev, B. A. Dzebojev, M. N. Dobrovolsky, Yu. I. Zharkikh, L. P. Zabarinskaya, V. N. Ishkov, V. I. Kaftan, E. O. Kedrov, N. I. Knipper, I. Yu. Kolesnikov, A. L. Kotikov, R. I. Krasnoperov, T. A. Krylova, A.S. Kudashin, L. M. Labuntsova, S. A. Lebedev, R. Yu. Lukyanova, A. A. Lushnikov, A. I. Manevich, Yu. S. Lyubovtseva, V. N. Morozov, V. A. Nechitaylenko, O. V. Nikiforov, B. P. Nikolov, M. V. Nisilevich, A. A. Odintsova, A. I. Pavlenko, D. V. Pantelev, V. A. Pilipenko, V. A. Pyatygin, A. G. Peshkov, A. G. Rodnikov, A. I. Rybkina, O. O. Samokhina, N. A. Sergejev, R. V. Sidorov, Al. A. Soloviev, An. A. Soloviev, E. N. Solovieva, V. R. Sultanov, V. N. Tatarinov, T. A. Tatarinova, E. Yu. Firsova, I. P. Shestopalov

**Editors in chief:**

A. A. Soloviev, 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 29.04.2016

**Layout Production:**

O. V. Alexanova, E. O. Kedrov

Report of Geophysical Center of RAS for 2015. Results of the State Task

M.: GC RAS, 2016, 159 pp., 69 Figs., 4 Tab.

**DOI: 10.2205/2016BS029**

**URL: <http://ebooks.wdcb.ru/2016/2016BS029/2016BS029.pdf>**

**ISSN: 2308-5983**

**© 2015 Geophysical Center RAS**



В настоящем издании содержатся сведения о выполнении государственного задания на 2015 год Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Геофизическим центром Российской академии наук, а также список публикаций и РИД.

**Авторский коллектив:**

С. М. Агаян, О. В. Алексанова, И. М. Алешин, Е. В. Артюшков, В. В. Алексанов, А. А. Астапенкова, Ю. В. Барыкина, Ш. Р. Богоутдинов, В. Г. Бондур, П. Б. Бородин, Е. В. Вавилин, О. Н. Васильева, И. Е. Витвицкая, А. Д. Гвишиани, В. Г. Гетманов, А. А. Груднев, Б. А. Дзедобоев, М. Н. Добровольский, Ю. И. Жарких, Л. П. Забаринская, В. Н. Ишков, В. И. Кафтан, Э. О. Кедров, Н. И. Книппер, И. Ю. Колесников, А. Л. Котиков, Р. И. Красноперов, Т. А. Крылова, А. С. Кудашин, Л. М. Лабунцова, С. А. Лебедев, Р. Ю. Лукьянова, А. А. Лушников, А. И. Маневич, Ю. С. Любовцева, В. Н. Морозов, В. А. Нечитайленко, О. В. Никифоров, Б. П. Николов, М. В. Нисилевич, А. А. Одинцова, А. И. Павленко, Д. В. Пантелеев, В. А. Пилипенко, В. А. Пятыгин, А. Г. Пешков, А. Г. Родников, А. И. Рыбкина, О. О. Самохина, Н. А. Сергеева, Р. В. Сидоров, Ал. А. Соловьев, Ан. А. Соловьев, Е. Н. Соловьева, В. Р. Султанов, В. Н. Татаринев, Т. А. Татаринова, Е. Ю. Фирсова, И. П. Шестоपालов

**Ответственные редакторы:**

Ан. А. Соловьев, д.ф.-м.н., заместитель директора по науке ГЦ РАН  
Т. А. Татаринова, ученый секретарь ГЦ РАН

**Редколлегия:**

А. Д. Гвишиани, академик РАН  
Э. О. Кедров, к.ф.-м.н.  
О. В. Алексанова

**Утверждено к печати 29.04.2016 г., тираж 10 экз.**

Компьютерная подготовка оригинал-макета: Э. О. Кедров, О. В. Алексанова

Отчет о выполнении государственного задания на 2015 год

М.: ГЦ РАН, 2016, 159 с., 69 ил., 4 табл.

**DOI: 10.2205/2016BS029**

**URL: <http://ebooks.wdcb.ru/2016/2016BS029/2016BS029.pdf>**

**ISSN: 2308-5983**

**© ГЦ РАН, 2016**

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Научная деятельность ГЦ РАН в 2015 году .....	6
2. Разработка информационных технологий организации доступа к ресурсам и совершенствование управления данными Мировых центров данных по физике твёрдой Земли и солнечно-земной физике .....	11
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 .....	39
5. Экстремальные события и реконструкция параметров солнечной активности по данным геомагнитных измерений в высоких широтах Земли .....	50
6. Сравнительное аналитическое исследование развития методов добычи углеводородов в РФ и других странах за 20 век с использованием компьютерных технологий, включая сферическую визуализацию .....	55
7. Новые математические методы моделирования геофизических процессов .....	62
8. Аналитическая геоинформационная система для комплексного изучения, прогнозирования и оценки стратегического сырья России .....	71
9. Исследование геомагнитного поля и разработка методов фильтрации его естественных вариаций в целях повышения точности наклонного бурения скважин в Арктическом регионе .....	77
10. Создание семейства численных физико-математических моделей для изучения и прогнозирования электродинамики верхней атмосферы Земли с использованием спутника SWARM и высокопроизводительных компьютерных систем .....	84
11. Разработка методов анализа и представления геофизических пространственных данных для тематического геопортала на основе современных ГИС-технологий .....	90
12. Разработка методов интеллектуального анализа геомагнитных данных и расширение экспериментальной базы наблюдений магнитного поля Земли .....	95
13. Распознавание предвестников магнитных бурь на основе частотно-временных представлений .....	102
14. Разработка инновационной технологии и создание экспериментального образца аппаратно-программного комплекса для мониторинга экстремальных геомагнитных явлений с использованием наземных и спутниковых данных .....	112
15. Усовершенствование моделей вариаций геомагнитного поля с использованием новых данных обсерваторий российско-украинского сегмента сети Интермагнет .....	118
16. Мониторинг нерегулярных динамических процессов геофизической природы методами дискретного математического анализа .....	123
17. Интеллектуальный анализ и комплексная интерпретация геофизических данных с использованием передовых технологий сферической визуализации .....	129
18. Применение системного анализа для оценки сейсмической опасности в регионах России, включая Кавказ–Крым и Алтай–Саяны–Прибайкалье .....	134
19. Международная деятельность ГЦ РАН .....	144
Список публикаций и РИД за 2015 год .....	147

## 1. Научная деятельность ГЦ РАН в 2015 году

Научная работа подразделений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизического центра Российской академии наук (ГЦ РАН) была сосредоточена на выполнении государственного задания ГЦ РАН, утвержденного 05.10.2015 года, которое включает в себя работы по четырем темам НИР и восьми проектам программ Президиума и ОНЗ РАН. Кроме этого выполнялись работы по трем грантам РФФИ, одному проекту РНФ и одному проекту в рамках реализации федеральной целевой программы.

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

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

Разделам перечня критических технологий Российской Федерации:

- 19. Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации её загрязнения;
- 21. Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

А также по направлениям Программы фундаментальных научных исследований государственных Академий наук на 2013–2020 гг.:

- 77. 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;
- 78. Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий;
- 80. 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);
- 3. Математическое моделирование;
- 70. Физические поля, внутреннее строение Земли и глубинные геодинамические процессы;
- 39. Архитектура, системные решения, программное обеспечение, стандартизация и информационная безопасность информационно-вычислительных комплексов и сетей новых поколений, системное программирование.

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 твёрдой Земли и солнечно-земной физике» (0145-2014-0001). Руководители – гл.н.с., к.ф.-м.н. Н. А. Сергеева; гл.н.с., д.т.н. В. И. Кафтан; зав. лаб., к.ф.-м.н. Э. О. Кедров; зав. сектором А. И. Рыбкина; в.н.с., д.ф.-м.н. С. А. Лебедев.
2. Тема № 01201456270 «Исследование и прогнозирование нелинейных геодинамических процессов в гетерогенной блочной среде при подземной изоляции радиоактивных отходов» (0145-2014-0002). Руководители – гл.н.с., д.т.н. В. Н. Морозов; зав. лаб., д.т.н. В. Н. Татаринев.
3. Тема № 115021010261 «Экстремальные события и реконструкция параметров солнечной активности по данным геомагнитных измерений в высоких широтах Земли» (0145-2014-0014). Руководитель – гл.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 – гл.н.с., д.ф.-м.н. А. А. Лушников.

А также по проектам программ Президиума и ОНЗ РАН:

5. Проект «Аналитическая геоинформационная система для комплексного изучения, прогнозирования и оценки стратегического сырья России» программы Президиума РАН 27П (I.5П) «Месторождения стратегического сырья в России: инновационные подходы к их прогнозированию, оценке и добыче». Руководитель директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани (отв. исполнитель к.ф.-м.н. Р. И. Красноперов).
6. Проект «Разработка методов анализа и представления геофизических пространственных данных для тематического геопортала на основе современных ГИС-технологий» программы ОНЗ РАН 7 (IV.8.7) «Интеллектуальный анализ геофизических данных, геоинформатика и математическая геофизика». Руководитель г.н.с., д.т.н. В. Г. Гетманов (отв. исполнитель к.ф.-м.н. Р. И. Красноперов).
7. Проект «Разработка методов интеллектуального анализа геомагнитных данных и расширение экспериментальной базы наблюдений магнитного поля Земли» программы ОНЗ РАН 7 (IV.8.7) «Интеллектуальный анализ геофизических данных, геоинформатика и математическая геофизика». Руководитель г.н.с., д.т.н. В. Г. Гетманов (отв. исполнитель зам. директора по науке, д.ф.-м.н. Ан. А. Соловьев).
8. Проект «Распознавание предвестников магнитных бурь на основе частотно-временных представлений» программы ОНЗ РАН 7 (IV.8.7) «Интеллектуальный анализ геофизических данных, геоинформатика и математическая геофизика». Руководитель г.н.с., д.т.н. В. Г. Гетманов.
9. 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.4П

«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 (отв. исполнитель зав. сектором А. И. Рыбкина).

10. Проект «Исследование геомагнитного поля и разработка методов фильтрации его естественных вариаций в целях повышения точности наклонного бурения скважин в Арктическом регионе» программы Президиума РАН 44П (П.3П) «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации». Руководитель директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани (отв. исполнитель гл.н.с., д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова).
11. 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 43П (П.4П) «Фундаментальные проблемы математического моделирования». Руководитель директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани (отв. исполнитель гл.н.с., д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова).
12. Проект «Новые математические методы моделирования геофизических процессов» программы Президиума РАН 43П (П.4П) «Фундаментальные проблемы математического моделирования». Руководитель директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани (отв. исполнитель гл.н.с., д.ф.-м.н. А. А. Лушников).

Перечень научных исследований за счет средств от приносящей доход деятельности в 2015 г. включал в себя:

13. 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.
14. Грант РФФИ № 14-05-90419 «Усовершенствование моделей вариаций геомагнитного поля с использованием новых данных обсерваторий российско-украинского сегмента сети Интермагнет. Руководитель директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани.
15. Грант РФФИ № 15-05-07436 «Мониторинг нерегулярных динамических процессов геофизической природы методами дискретного математического анализа». Руководитель директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани.
16. 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, д.ф.-м.н. Ан. А. Соловьев.

17. Грант РФФ № 15-17-30020 «Применение системного анализа для оценки сейсмической опасности в регионах России, включая Кавказ–Крым и Алтай–Саяны–Прибайкалье». Руководитель гл.н.с., чл.-корр. РАН Ал. А. Соловьев.

Важнейшими результатами научных исследований в 2015 году, утвержденными на заседании Ученого совета ГЦ РАН № 36 от 15.12.2015 г., стали следующие:

### 1.1. Создание современной системы регистрации, публикации и цитирования геофизических данных с присвоением цифрового идентификатора объекта DOI

В 21 веке получение новых данных рассматривается как полноценный результат научного исследования, подлежащий распространению и цитированию, как и другие научно-исследовательские источники информации. В ГЦ РАН запущен проект «База данных по наукам о Земле» (ESDB), направленный на создание современной системы регистрации, публикации и цитирования геофизических данных с присвоением цифрового идентификатора объекта (Digital Object Identifier, DOI), предназначенного для идентификации интеллектуальной собственности в виртуальной среде. Первым результатом было присвоение DOI-индексов данным геомагнитной обсерватории «Климовская» российского сегмента сети Интермагнет. Создан локальный депозиторий (веб-сайт) страниц-отклика на DOI-индекс, содержащих описание публикуемых данных и адрес (URL), по которому данные доступны в сети (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Схематическое изображение проекта ESDB

## 1.2. Создание метода системного анализа для распознавания мест возможного возникновения эпицентров значительных, сильных и сильнейших землетрясений

В ГЦ РАН был предложен метод системного анализа для распознавания мест возможного возникновения эпицентров значительных, сильных и сильнейших землетрясений. Метод является инвариантным по отношению к масштабам изучаемых подобных сейсмических явлений. Он впервые делает распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений процедурой системного анализа. Основной его характеристикой, делающей его методом системного анализа, является возможность выделения изучаемой системы из внешней инфраструктуры. При помощи предложенного метода системного анализа проведено распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильнейших землетрясений ( $M \geq 7,75$ ) в горном поясе Анд Южной Америки и значительных землетрясений ( $M \geq 5$ ) на Кавказе (рис. 1.2).

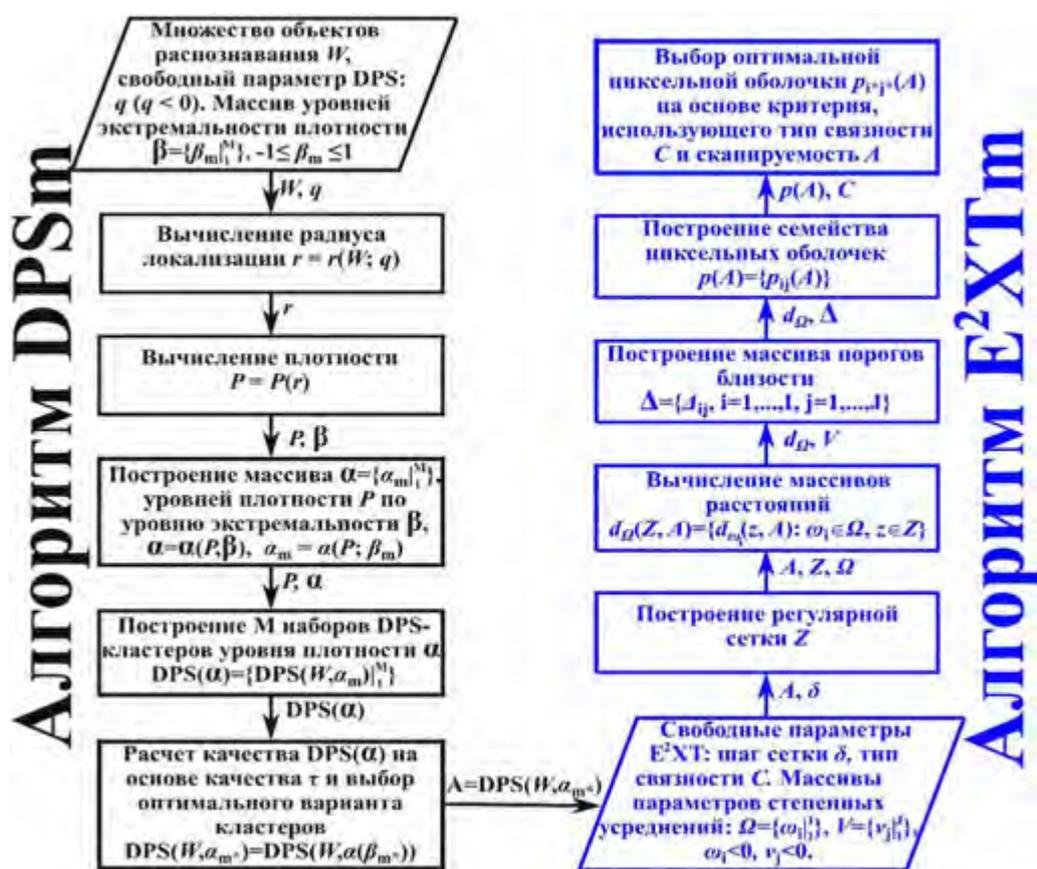


Рисунок 1.2 – Блок-схема алгоритмической системы FCAZm

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

Номер гос. регистрации № 01201456271 (0145-2014-0001)

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

### **2.1. Разработка новых информационных технологий доступа к данным МЦД, развитие пользовательского интерфейса, расширение информационных ресурсов в свободном доступе на сайтах Центров. Совершенствование управления данными в МЦД по СЗФ и ФТЗ**

В 2015 г. основным объектом исследования, обработки и реорганизации были все виды данных по разделам «Ионосферные явления» и «Сейсмология».

Проведена инвентаризация ионосферных данных, проверены и дополнены записи о наличии данных в регистрационной системе. Реорганизованы веб-страницы доступа к данным, размещенным на сайте МЦД по разделу «Ионосферные явления» (рис. 2.1). Обращение к каждому виду данных организовано по прямым ссылкам. Проанализированы данные, представленные ранее на сайте, подготовлены и размещены на сайте новые описания данных и форматов вместо существовавших с 1995 г., каталог наличия ионограмм (в виде микрофильмов) по мировой сети станций, файл данных об ионосферных станциях.

Созданы программы, позволившие извлечь из глобальной базы данных параметров вертикального зондирования ионосферы на CD-ROM дисках [1] данные 35 ионосферных станций России и стран СНГ за период 1957–1990 гг. и сформировать массивы этих данных в соответствии с принятыми в системе МЦД требованиями – как отдельные файлы таблиц за год для каждого параметра ионосферы. Данные по 14 станциям представлены на сайте (2557 файлов, 176 Мб, таблица 2.1).

Проведена верификация и реорганизация данных об ионосферном слое F2, полученных на научно-исследовательских дрейфующих станциях «Северный полюс-6» и «Северный полюс-7». Разработаны программы для тестирования ионосферных данных, получаемых со станции «Москва» (ИЗМИРАН). Проанализирован архив этих данных за 2008–2015 гг. Сформированы годовые файлы для каждого параметра.



Рисунок 2.1 – Главная страница раздела сайта «Ионосферные явления»

Таблица 2.1 – Данные ионосферных станций, представленные на сайте МЦД по СЗФ

Название станции	Наличие данных	Название станции	Наличие данных
Ашхабад	1957–1962, 1964–1987, 1989–1990	Новосибирск	1969–1973, 1975–1990
Диксон	1957–1959, 1982–1986, 1988–1990	Петропавловск	1968–1974, 1989–1990
Хабаровск	1959–1983, 1986–1990	Ростов	1957–1980
Ленинград	1957–1990	Салехард	1957–1974, 1988–1990
Магадан	1968–1990	Томск	1957–1990
Лопарская	1957–1962, 1964–1977, 1981–1984, 1986, 1989–1990	Ташкент	1961–1962, 1964–1990
Москва	1957–1990, 2008–2015	Подкаменная	1968–1990

С целью предотвращения утраты ценнейших исторических архивных данных и увеличения объема информационных ресурсов в электронном виде начата работа по переводу исторических данных ионосферных станций России и стран СНГ, представленных в виде таблиц часовых значений параметров ионосферы и  $f$ ,  $h$  и  $E$ -графиков на бумажном носителе, в электронную форму (файлы в формате PDF) путем поточного сканирования. Все созданные электронные документы проходят процедуры проверки и редактирования с использованием ПО ScanSoft PaperPort. Составляется каталог электронных документов.

По разделу «Сейсмология» дополнены данными за 2014 г. информационные ресурсы, представленные в свободном доступе на сайте – Оперативный сейсмологический каталог и Сейсмологический бюллетень ГС РАН. Проведена работа по дополнению каталогов землетрясений по регионам Северной Евразии данными за 2008 г.

Сформирована и размещена на сайте МЦД база данных о гипоцентрах землетрясений в 6 сейсмоактивных регионах территории Северной Евразии за период 1962–1991 гг. Разработано ПО, позволяющее удаленному пользователю выбирать из БД необходимые данные по условиям, задаваемым в специальной форме запроса (рис. 2.2), и сохранять полученные после выборки данные в выходной файл в формате \*.CSV или \*.TXT. При создании БД использовались следующие программные среды: Denwer 3 (MySQL версии 5.5 и phpMyAdmin версии 3.5.1), Microsoft Excel 2013, Adobe Dreamweaver CS6.

The screenshot shows the website interface for the World Data Center for Solid Earth Physics. The main heading is 'Форма запроса на данные о землетрясениях' (Form for requesting earthquake data). The search form includes the following fields and options:

- Выберите регион:
- Широта, мин.-макс.:
- Долгота, мин.-макс.:
- Глубина, мин.-макс.:
- Энергетический класс, мин.-макс.:
- Временной интервал, гггг-мм-дд:
- начало-конец
- Найти и вывести

Additional elements on the page include a left sidebar with navigation links (Главная страница, Данные, Сейсмология, Гравиметрия, Телловой поток, Магнитные измерения, О Центре, Новости, Проекты, Карта сайта, Адрес), a top navigation bar with 'Сейсмология > Каталоги землетрясений > Региональные данные', and two book covers on the right titled 'ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В СССР'.

Рисунок 2.2 – Форма запроса к базе данных о гипоцентрах землетрясений

Продолжалось выполнение проекта по переводу с бумажного носителя в электронную форму данных по разделу «Геомагнитные вариации» путем поточного сканирования. Завершен перевод в электронную форму таблиц среднечасовых значений элементов геомагнитного поля обсерваторий РФ и стран СНГ (более 50 000 документов

формата А3). Проводилась процедура проверки и редактирования электронных документов с использованием ПО ScanSoft PaperPort, составлялся каталог. Электронные документы, прошедшие проверку, размещены на сайте (таблица 2.2). Данные 8 станций (23 годовых комплекта таблиц) одновременно были переведены в цифровую форму в коде ASCII и добавлены в массив среднечасовых данных на сайте.

Для подключения информационных ресурсов по разделам «Сейсмология» и «Ионосферные явления» к Порталу МСД подготовлены метаданные в стандарте ISO на языке XML и размещены в репозитории метаданных, из которого по протоколу OAI-PMH включены в базу метаданных Портала.

**Таблица 2.2 – Данные среднечасовых значений элементов геомагнитного поля, переведенные в электронную форму и размещенные на сайте**

<b>Код станции</b>	<b>Название станции</b>	<b>Наличие данных</b>	<b>Код станции</b>	<b>Название станции</b>	<b>Наличие данных</b>
AAA	Алма-Ата	1963–1969, 1973–1974	NVL	Новолазаревская	1969, 1978
ASH	Ашхабад	1959–1970, 1972–1989	ODE	Одесса	1957–1978
CCS	Мыс Челюскин	1957–1975	PET	Петропавловск	1973–1975, 1983
CWE	Уэллен	1957–1969	PIO	Пионерская	1957–1958
KZN	Казань	1957–1962	SRE	Средникан	1957–1966
MGD	Магадан	1966–1970, 1973–1975	TIK	Бухта Тикси	1957–1967, 1970–1977
MMK	Мурманск	1958–1973, 1976–1978	UBA	Улан-Батор	1967–1968, 1970
NKK	Новоказалинск	1974–1975	VLA	Владивосток	1957–1978

В 2015 г. значительно увеличился массив данных о солнечной активности на сайте. Дополнены данные о потоке радиоизлучения Солнца с длиной волны 10,7 см, о солнечных

пятнах, о значениях полярности межпланетного магнитного поля, а также каталог солнечных вспышечных событий 24 цикла СА.

В соответствии с решением Научного комитета МСД в феврале 2015 г. были подготовлены отчеты о деятельности двух МЦД за двухлетний период 2013–2014 гг. и представлены (через интерактивную систему) в Международное программное бюро Мировой системы данных (IPO ICSU-WDS). Отчеты были просмотрены рецензентами Научного комитета и получили положительную оценку.

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

В 2015 г. выполнена подборка геолого-геофизических данных для региона Баренцева моря, расположенного в западной части Евразийского шельфа. На рис. 2.3 представлен глубинный разрез земной коры и верхней мантии, расположенный в пределах Баренцевской (Свальбардской) плиты и Северо-Баренцевской впадины. Разрез построен по данным многочисленных сейсмических исследований по методике, разработанной в МГУ и использованной ранее для изучения геодинамики активных и пассивных окраин Евразийского континента [2, 3].



**Рисунок 2.3 – Сейсмогеологический разрез земной коры и верхней мантии. 1 – осадочный слой, 2 – верхняя кора, 3 – средняя кора, 4 – нижняя кора, 5 – мантия, 6 – Мохо, 7 – главные разделы в коре, 8 – разломы, 9 – изолинии скорости, 10 – структурные швы, 11 – области anomalно низких скоростей**

Кора Свальбардской плиты имеет трехслойное строение. Поверхность Мохо здесь прослежена в виде отрезков на глубинах 40–45 км. Нижняя кора имеет сложное складчато-надвиговое строение. Такие деформации возникают в обстановке сжатия континентальной окраины под воздействием уходящей под континент зоны субдукции. Строение средней и верхней коры также свидетельствует об обстановке сжатия. Мощность осадочного слоя достигает более чем 20 км в области Демидовского авлакогена

и сокращается до 7 км в районе поднятий. Кора Северо-Баренцевской впадины двухслойная и имеет меньшую мощность 25–30 км. Осадочный слой повышенной мощности до 15–20 км характеризуется периодическим строением. Верхняя часть осадочного слоя на глубинах до 10 км разбита разломами. Подстилающая верхняя кора повышенной мощности (около 15 км) вблизи своей кровли обладает пониженной скоростью, в ней не прослеживаются разрывные нарушения, и можно предположить, что этот слой является пластичным. Утоненная нижняя кора мощностью до 10 км разбита разломами и образует блоки шириной 50–100 км. Это хрупкий слой. Шовная зона на границе между Северо-Баренцевской впадиной и структурами Свальбардской плиты может быть интерпретирована как зона палеосубдукции, углубляющаяся к югу, юго-западу и юго-востоку.

Можно сделать вывод, что впадины Баренцева моря развивались как внутрикратонные впадины, в дальнейшем разрушенные рифтогенными процессами. Формирование их связано с раскрытием Северного Ледовитого океана в мезозое и кайнозое, в результате которого они стали частью континентальной окраины с накоплением мощных толщ морских песчано-глинистых пород.

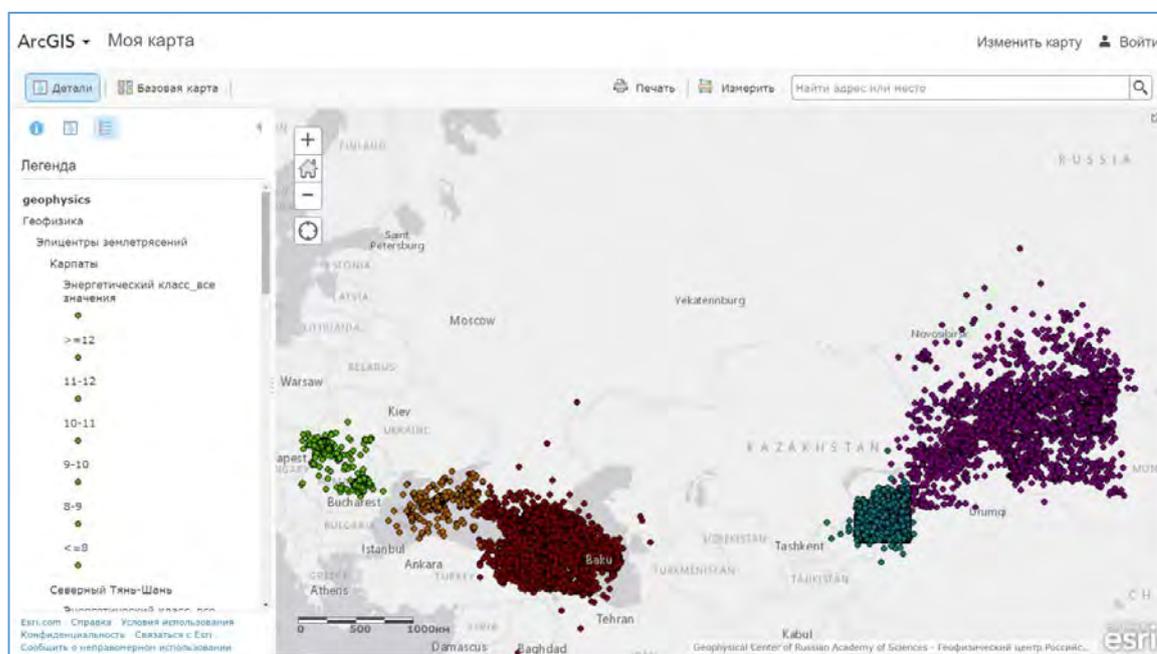
### **2.3. Изучение влияния физических полей различной природы на геодинамические процессы с целью создания нового подхода к прогнозированию природных катастроф**

В 2015 г. продолжены исследования, выполненные в 2010–2014 г., о связи потоков нейтронов с эндогенной активностью Земли. В 2015 г. на нескольких нейтронных мониторах зарегистрированы возрастания, интенсивность потоков которых достигала около 1000 % от фона. Предполагается, что они имеют земное происхождение. Показана связь этих всплесков с солнечной активностью и состоянием межпланетной среды. В период, когда были зарегистрированы всплески нейтронов, в межпланетном пространстве наблюдались структурные образования, сформированные высокоскоростными потоками солнечного ветра. Эти потоки имели как вспышечное происхождение, так и не связанное со вспышкой. Рассматривались события в марте и августе 2015 г. Для описания событий использовались данные со спутников GOES, ACE, SOHO.

### **2.4. Развитие геоинформационных технологий с целью повышения эффективности анализа пространственно-временного распределения геофизических полей. Расширение базы геопространственных данных ГИС по геологии, геофизике и дистанционному зондированию**

**Подготовка и оформление цифровых тематических карт в среде ГИС. Публикация картографических веб-сервисов.** В 2015 г. расширена база геопространственных данных Интеллектуальной ГИС «Данные наук о Земле по территории России». Были добавлены данные об эпицентрах землетрясений по регионам:

Алтай, Кавказ, Крым, Карпаты, Северный Тянь-Шань. Данные были преобразованы из табличного вида в ГИС-совместимый формат share. Составлено 5 слоев данных для каждого из регионов. На каждый из подготовленных слоев данных составлены подробные метаданные, включенные в общую базу метаданных ГИС. Подготовленные слои добавлены в созданный и опубликованный ранее картографический веб-сервис «Геофизика» (рис. 2.4).



**Рисунок 2.4 – Карта эпицентров землетрясений регионов: Карпаты, Крым, Кавказ, Алтай и Северный Тянь-Шань**

На рис. 2.4 эпицентры отображены с помощью цветных пунсонов. Цвета пунсонов соответствуют конкретному региону. Отображение карты осуществляется средствами веб-сервиса ArcGIS.com.

**Внедрение новых технических решений по расширению функциональных возможностей геопортала gis.gcras.ru.** Основным инструментом доступа к базе геопространственных данных, опубликованных на серверах ГЦ РАН в форме картографических веб-сервисов, является геопортал Интеллектуальной ГИС «Данные наук о Земле по территории России». В 2015 г. работы по улучшению функциональных возможностей геопортала включали: обновление доступных картографических сервисов, реализацию функции просмотра опубликованных картографических сервисов средствами геопортала, реализацию функции авторизованного доступа.

## **2.5. Выполнение функций Национального геофизического комитета РАН**

В 2015 г. деятельность Национального геофизического комитета РАН была направлена на подготовку к участию России в 26-й Генеральной ассамблее Международного геодезического и геофизического союза (Прага, 22 июня–2 июля). В работе Ассамблеи приняли участие более 4 тыс. человек из 90 стран мира, из них около 200 представителей России. Программа Ассамблеи включала более 3 200 устных и 2 200 стендовых докладов. В Ассамблее приняли участие 10 представителей Геофизического центра РАН, четверо из них получили финансовую поддержку. Два представителя ГЦ РАН были избраны в руководящие и рабочие органы МГГС: Р. Ю. Лукьянова – в Исполнительный комитет Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии (МАГА), А. А. Соловьев избран председателем Межведомственной комиссии по истории МАГА.

Бюро НГК вело активную работу по публикации национальных отчетов секций комитета. Каждая из 8 секций подготовила и представила отчет, отражающий основные научные достижения за предшествующие четыре года. Отчеты опубликованы в электронном сериальном издании «Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН».

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

Публикации вообще и электронные в особенности являются одним из важнейших звеньев в спиралеобразном процессе обработки, представления и документирования научного контента (т.е. результатов обсерваторских наблюдений и математического моделирования, научных публикаций, библиографических данных и пр.).

Информация, полученная из данных, становится данными для следующего этапа, и так далее, т.е. знание производится в результате движения по возрастающей спирали. Опубликованная научная статья – это, по существу, некий промежуточный финиш в этом движении по спирали. Для того, чтобы он не повисал в воздухе, необходимо выполнение двух условий: (1) представить его в форме, легко доступной на следующем этапе исследования, и (2) он должен содержать ссылки на доступные источники данных/информации, использованные в качестве исходных данных.

Развитие технологий электронных публикаций значительно увеличило 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.

Трудно переоценить возможности, которые новые технологии дают автору, издателю и читателю при публикации научных и образовательных журналов и книг в

современных форматах, доступных не только на десктопах, но и на портативных устройствах (планшетах, е-ридерах, смартфонах).

В рамках выполнения данной НИР в ГЦ РАН был разработан ряд пакетов (включая апгрейдинг ранее разработанного ПО) для подготовки интерактивных мультимедийных публикаций лекций и других материалов. Разработанная нами технология подготовки интерактивных лекций в формате Adobe Flash позволяет 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 2015 г. продолжена редакционно-техническая подготовка и издание двух онлайн-журналов – **Russian Journal of Earth Sciences** (RJES, ISSN 1681–1208), **Вестника ОНЗ РАН** (ISSN 1819–6586), а также сериального издания **Geoinformatics Research Papers** (GRPS, ISSN 2308–5983). Издания рецензируемые, публикуются в форматах PDF, HTML5 и EPUB3 с включением в них мультимедийных и интерактивных компонентов, что обеспечивает возможность чтения как на персональных компьютерах, так и на современных портативных устройствах, таких как планшеты, электронные книги и смартфоны.

В рамках выполнения заданий НИР на 2015 г. разработана существенно усовершенствованная версия LaTeX пакета elxpaper.sty (версия 1.4), которая зарегистрирована Роспатентом (свидетельство 2015615570 от 25.05.2015). Пакет ELXPAPER дополнен также программой конверсии LaTeX версий статей к формату HTML5 и конверсии HTML5 к форматам XHTML и EPUB3. Совокупность указанных программ, включая конфигурационные файлы и ряд вспомогательных free-domain программ, составляют программную среду, обеспечивающую как подготовку статей, так и генерацию версий статей в современных форматах представления.

Издано 4 выпуска RJES, включающих 12 статей, и 3 статьи и 209 кратких сообщений в Вестнике ОНЗ РАН, 11 отчетов и книг в GRPS.

На базе Мирового центра данных по солнечно-земной физике и лаборатории технологий хранения и распространения геофизических данных ГЦ РАН в 2015 г. запущен проект «База данных по наукам о Земле» (Earth Science DataBase, ESDB).

Главной целью проекта является повышение значимости и доступности геофизических данных для научных исследований, облегчение процесса их поиска, идентификации и публикации, а также развитие культуры цитирования данных. Получение новых данных рассматривается не как вспомогательная деятельность, а как важный полноценный результат научного исследования, подлежащий распространению и цитированию так же, как и другие научно-исследовательские источники информации – журналы, статьи, книги и т.д. Схематическое изображение проекта ESDB показано на рис. 2.5.



**Рисунок 2.5 – Схематическое изображение проекта ESDB**

ГЦ РАН является членом Международной ассоциации издателей научной литературы (PILA – Publishers International Linking Association) и участвует в проекте CrossRef. По этой причине была выбрана система регистрации и публикации геофизических данных с использованием префикса DOI-индекса 10.2205, который закреплен за ГЦ РАН, как за издателем.

Был разработан информационный ресурс, который на данный момент состоит из центрального депозитария, расположенного в ГЦ РАН (<http://esdb.wdcb.ru>). В дальнейшем планируется подключение локальных депозитариев в институтах и обсерваториях, представляющих данные.

Первоначально в качестве объекта регистрации были выбраны первичные данные, поставляемые геомагнитной обсерваторией «Климовская». Для описания метаданных была принята за основу CrossRef XML схема, которая является стандартом для описания не только публикаций, но и данных (рис. 2.6). Были подготовлены XML файлы,

содержащие описания для всей базы данных геомагнитной обсерватории «Климовская» и конкретного набора данных этой обсерватории – минутных значений элементов геомагнитного поля. В результате обсерватории «Климовская» были присвоены два DOI-индекса:

- **doi:10.2205/kli2011** – DOI базы данных «Климовская» (<http://esdb.wdcb.ru/doi/2015/kli2011.html>);
- **doi:10.2205/KLI2011min** – DOI набора данных «Климовская» минутные значения (<http://esdb.wdcb.ru/doi/2015/kli2011min.html>).

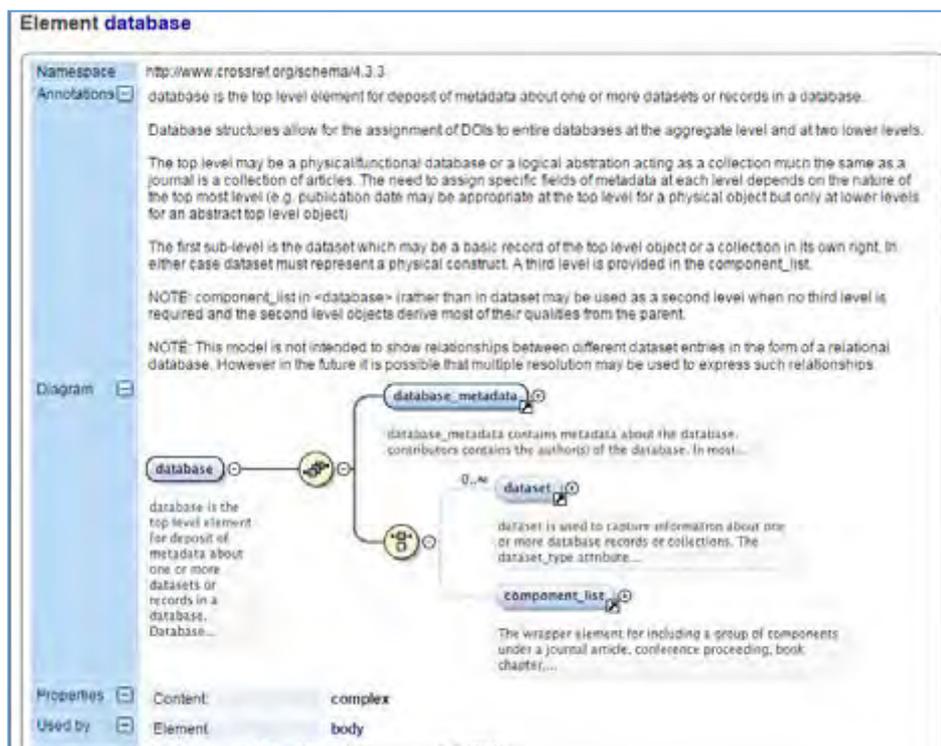


Рисунок 2.6 – Фрагмент XML схемы CrossRef

На следующем этапе планируется присвоение DOI архивным данным МЦД по СЗФ (часовые, минутные значений элементов геомагнитного поля и к-индексы). Будет проведена регистрация в CrossRef и публикация данных для 6 станций.

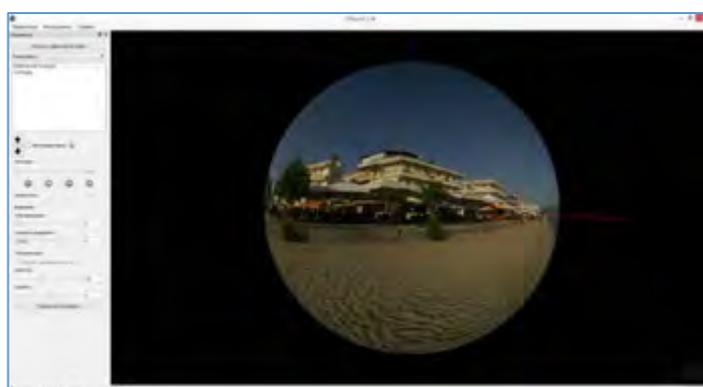
## 2.7. Развитие технологий сферической визуализации в области геопространственных данных по наукам о Земле

Методы сферической визуализации являются передовым средством визуализации геопространственных данных, которое позволяет производить мониторинг геофизических, географических и др. явлений в режиме динамической презентации, в том числе онлайн.

Для визуализации используется цифровой демонстрационный комплекс со сферическим проекционным экраном, разрабатываемый в Геофизическом центре РАН [4]. На данный момент импортозамещение в разрабатываемом оборудовании достигло 85%,

что является важным показателем для дальнейшего развития производственных работ. Ведутся активные работы по созданию инновационного проекционного экрана, не имеющего аналогов в мире. Работы ведутся совместно с ООО «Аквасервис» с использованием модифицированного акрилового материала.

В 2015 году программа «Орбус» получила дальнейшее развитие. Была полностью реализована английская версия приложения, что позволяет внедрять его в международном научном сообществе. На текущий момент поддерживаются русский и английский языки. Для поддержки мультиязычности использовался стандартный функционал библиотеки Qt. Также была добавлена поддержка сферических панорам (рис. 2.7). Сферическая панорама – это разновидность фотопанорам, которая позволяет наблюдателю видеть окружающее пространство в любом направлении, включая верх и низ.



**Рисунок 2.7 – Пример отображения панорамных снимков в ПО «Орбус»**

Также была произведена сборка приложения в 64х-битном варианте, произведено обновление основных библиотек до последних актуальных версий, и обновлена среда разработки. По итогам проведенных работ были использованы Visual Studio 2013, OpenSceneGraph 4.4, Qt 5.4, GDAL 1.11.2, ffmpeg 2.7 и другие. Технических сложностей с переходом не возникло. ПО «Орбус» функционирует без сбоев.

## **2.8. Исследование статистической зависимости изменений уровня Каспия и космо-геофизических процессов**

Выполнен реанализ временных рядов среднегодовых характеристик солнечной и геомагнитной активности, скорости вращения Земли в связи с изменениями уровня Каспийского моря. Используемые обновленные данные содержат как традиционные, так и спутниковые наблюдения. Получены кинематические модели долгопериодических изменений исследуемых процессов. Сопоставление моделей показывает высокую степень взаимной отрицательной корреляции исследуемых космо-геофизических процессов с изменениями уровня Каспия. Этот результат демонстрирует вероятную соподчиненность исследуемых процессов, что, в свою очередь, позволяет сделать прогноз их изменений на ближайшие годы. Полученные статистические зависимости противоречат гипотезе о

высоком вкладе антропогенного воздействия в характер глобальных и региональных земных и климатических изменений.

## **2.9. Межгодовая изменчивость гидродинамического режима Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии**

Разработана методика расчета синоптической динамической топографии Каспийского моря как суперпозиции средней климатической динамической топографии, рассчитанной по термогидродинамической модели Гидрометцентра РФ и поля аномалий уровня моря, рассчитанного по данным спутниковой альтиметрии. Анализ завихренности поля геострофических течений подтвердил преобладание циклонической циркуляции в Северном и Среднем Каспии и антициклонической – в Южном. После 2008 г. завихренность почти во всех частях моря увеличилась, что говорит об изменении режима атмосферной циркуляции над акваторией Каспийского моря. Совместный анализ изменчивости среднегодовых величин скоростей течений и завихренности поля течений показывает, что средние скорости течений обратно зависимы от завихренности. С 1993 г. по 2007 г. завихренность поля течений падала со скоростью  $-0,17 \pm 0,02 \cdot 10^{-7}$  в год, а модуль скорости рос со скоростью  $+0,11 \pm 0,06$  см/с в год. После 2008 г. ситуация перевернулась на противоположную. Завихренность поля течений росла со скоростью  $+0,75 \pm 0,12 \cdot 10^{-7}$  в год, а модуль скорости падал ( $-0,47 \pm 0,19$  см/с в год).

### **Список публикаций по результатам НИР<sup>1</sup>**

1. Кедров О. К., Кедров Э. О. Применение спектрального метода для оценки добротности среды по землетрясениям в Центральной Азии // Физика Земли. 2015. № 1. С. 54–62.
2. **Ishkov V. N.** Solar flare super-events: when they can occur and the energy limits of their realization // Sun and Geosphere. 2015. V. 10. P. 89–96. ISSN 1819–0839 <http://newserver.stil.bas.bg/SUNGEO/00SGArhiv/SG v10 No1 2015-pp-89-96.pdf>.
3. Базилевская Г. А., Логачёв Ю. И., Вашенюк Э. В., Дайбог Е. И., **Ишков В. Н.** и др. Солнечные протонные события в циклах солнечной активности 21–24 // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 627–630.
4. **Лебедев С. А.** Динамика Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 72–85.

### **Свидетельства о государственной регистрации**

1. № 2015615570 от 25.05.2015. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «ELXPAPER». Автор **В. А. Нечитайленко**.

---

<sup>1</sup> Здесь и далее выделены фамилии сотрудников ГЦ

## Список использованных источников

1. Ionospheric Digital Database, Worldwide Vertical Incidence Parameters. CD-ROM Dataset. Release 1.0. NOAA, NGDC, Boulder, Colorado, 80303, USA. 1994. [Электронный ресурс] – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) + прил. (26 с.) USDC.
2. Пийп В. Б., **Родников А. Г.** Глубинные структуры континентальной окраины Приморье – Японское море по сейсмическим данным // Вестник МГУ. Геология. 2009. № 2. С. 61–67.
3. **Родников А. Г., Забаринская Л. П., Пийп В. Б., Сергеева Н. А., Нисилевич М. В.** Геодинамика осадочных бассейнов пассивных континентальных окраин Арктики // Труды 47 Тектонического совещания «Тектоника и геодинамика континентальной и океанической литосферы: общие и региональные аспекты». Том 2. М.: ГЕОС, 2015. С. 112–117.
4. **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.

## Полный список научных публикаций и свидетельств о регистрации результатов интеллектуальной деятельности по теме НИР за 2015 г.

1. Кедров О. К., **Кедров Э. О.** Применение спектрального метода для оценки добротности среды по землетрясениям в Центральной Азии // Физика Земли. 2015. № 1. С. 54–62. DOI:10.7868/S0002333714050020.
2. Kedrov O. K., **Kedrov E. O.** Application of the spectral method for estimating the Q factor of the medium from the earthquakes in Central Asia // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. Vol. 51, Issue 1. P. 51–59. DOI:10.1134/S1069351314050024.
3. Логачёв Ю. И., Базилевская Г. А., Вашенюк Э. В., Дайбог Е. И., **Ишков В. Н.,** Лазутин Л. Л., Мирошниченко Л. И., Назарова М. Н., Петренко И. Е., Ступишин А. Г., Сурова Г. М., Яковчук О. С. Сравнение протонной активности в 20–23 циклах солнечной активности // Геомagnetизм и аэрономия. 2015. № 2. С. 291–301. DOI:10.7868/S001679401503013X.
4. Logachev Yu. I., G. A. Bazilevskaya, E. V. Vashenyuk, E. I. Daibog, **V. N. Ishkov,** L. L. Lazutin, L. I. Miroshnichenko, M. N. Nazarova, I. E. Petrenko, A. G. Stupishin, G. M. Surova, O. S. Yakovchouk A comparison of proton activity in cycles 20–23 // Geomagnetism and Aeronomy. 2015. Vol. 55. Issue 3. P. 277–286. DOI: 10.1134/S0016793215030135.
5. Sharkov E., Lebedev V., Chugaev A., **Zabarinskaya L., Rodnikov A., Sergeeva N.,** Safonova I. The Caucasian-Arabian segment of the AlpineHimalayan collisional belt: Geology, volcanism and neotectonics // Geoscience Frontiers. 2015. V. 6. Iss. 4. P. 513–522. DOI: 10.1016/j.gsf.2014.07.001.
6. **Ishkov V. N.** Solar flare super-events: when they can occur and the energy limits of their realization // Sun and Geosphere. 2015. V. 10. P. 89–96. ISSN 1819–0839.
7. Базилевская Г. А., Логачёв Ю. И., Вашенюк Э. В., Дайбог Е. И., **Ишков В. Н.** и др. Солнечные протонные события в циклах солнечной активности 21–24 // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 627–630.
8. Bazilevskaya G. A., Logachev Yu. I., Vashenyuk E. V., Daibog E. I., **Ishkov V. N.,** Lazutin L. L., Miroshnichenko L. I., Nazarova M. N., Petrenko I. E., Surova G. M., and Yakovchouk O. S. Solar proton events in solar activity cycles 21–24 // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2015. V. 79. No. 5. P.573–576. ISSN 1062–8738.
9. **Лебедев С. А.** Динамика Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 72–85.
10. **Ишков В. Н.** Солнце в октябре–ноябре 2014 г. // Земля и Вселенная. РАН. Наука. 2015. № 1. С. 22–26.

11. **Ишков В. Н.** Солнце в декабре 2014 г.–январе 2015 г. // Земля и Вселенная. 2015. № 3. С. 32–35.
12. **Ишков В. Н.** Солнце в феврале–марте 2015 г. // Земля и Вселенная. 2015. № 4. С. 30–33.
13. **Nechitailenko V. A.** Record of science technologies. I. Online journal // Geoinf. Res. Papers. 2015. V. 3. BS1001. doi:10.2205/2015BS016.
14. Костяной А. Г., **Лебедев С. А.**, Семенов А. В. Спутниковый мониторинг трансграничных вод России // Проблемы постсоветского пространства. 2015. № 2(4). С. 18–33.
15. **Родников А. Г., Забаринская Л. П., Пийп В. Б., Сергеева Н. А., Нисилевич М. В.** Геодинамика осадочных бассейнов пассивных континентальных окраин Арктики // Труды 47 Тектонического совещания «Тектоника и геодинамика континентальной и океанической литосферы: общие и региональные аспекты». Том 2. М.: ГЕОС, 2015. С. 112–117.
16. **Родников А. Г., Забаринская Л. П., Сергеева Н. А.** Зона контакта Евразийского континента и Тихого океана: геодинамика, глубинное строение // Материалы III Школы – семинара «Гординские чтения», Москва, 21–23 апреля 2015 г. ИФЗ РАН. С. 36–40.
17. **Родников А. Г., Забаринская Л. П., Сергеева Н. А.** Глубинное строение регионов природных катастроф переходной зоны Евразия – Тихий океан // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска. Всероссийская научная конференция с международным участием, 26–30 мая 2015 г. г. Южно-Сахалинск, Россия. Сборник материалов. Том 2. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 132–136.
18. **Родников А. Г., Забаринская Л. П., Сергеева Н. А.** Моделирование глубинного строения окраинных морей Тихого океана вдоль геотраверсов // Труды IV Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU)», 19–24 октября 2015 г., Москва, Ломоносовский корпус МГУ. М.: Феория, 2015. С. 51–54.
19. **Шестопалов И. П., Дубовик В. М.** О взаимосвязи эндогенной активности Земли с солнечной активностью и наземный мониторинг нейтронов для разработки нового подхода прогнозирования землетрясений, вулканических извержений и других неблагоприятных природных явлений // Материалы научного семинара «Система Планета Земля». Геологический факультет МГУ. Москва. 2015. С. 68–101.
20. **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», 26–29 мая 2015 г. СПб.: РАНХиГС, 2015. С. 18–26.
21. **Лебедев С. А., Костяной А. Г., Гинзбург А. И.** Динамика Каспийского моря по данным инструментальных измерений, результатам моделирования и данным дистанционного зондирования // Материалы III Международной научно-практической конференции «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». Майкоп, Россия, 11–14 мая 2015. Майкоп: Кучеренко В. О., 2015. С. 146–179.
22. Костяной А. Г., **Лебедев С. А.**, Семенов А. В. Спутниковый мониторинг трансграничных вод России // Актуальные проблемы развития постсоветского пространства: материалы международной научно-практической конференции (г. Москва, 2 апреля 2015 г.) / Отв. ред. С. С. Жильцов. М. МГОУ, 2015. С. 33–53.
23. **Лебедев С. А.** Спутниковая альтиметрия Каспийского моря // Материалы Международной научно-практической конференции «Обеспечение гидрометеорологической и экологической безопасности морской деятельности», 16–17 октября 2015 года, Астрахань, Россия. С. 152–154.
24. **Nisilevich M., Kedrov E., Astapenkova A., Nechitailenko V., Sergeeva N.** Earth Science DataBase Project – ESDB // 26th IUGG General Assembly, 2015. “Earth and Environmental Sciences for Future Generations”. Prague, Czech Republic, Prague Congress Center, 22 June–2 July 2015 / A06c-

- JA06c JA6 Data on the Edge: Preservation and Utilization of Historical Data in the Geosciences (IAGA, IASPEI, IAMAS, IAG, IAHS, IACS) Abstract: IUGG-0600.
25. **Nisilevich M., Sergeyeva N., Rodnikov A., Zabarinskaya L.** Rescue of Historical Data in the World Data Center for Solid Earth Physics // 26th IUGG General Assembly, 2015. "Earth and Environmental Sciences for Future Generations". Prague, Czech Republic, Prague Congress Center, 22 June–2 July 2015. JA06p-JA06p JA6 Data on the Edge: Preservation and Utilization of Historical Data in the Geosciences (IAGA, IASPEI, IAMAS, IAG, IAHS, IACS) Abstract: JA06p-202.
  26. Savinykh V. P., **Kaftan V. I.** Preface to the national report to the international association of geodesy of the international union of geodesy and geophysics 2011–2014. National report to the International association of geodesy of the International union of geodesy and geophysics 2011–2014 // International scientific, technical and industrial electronic journal "Geo Science". 2015. № 3. P. 7–8.
  27. **Kaftan V. I.,** Malkin Z. M., Pobedinsky G. G., Stoliarov I. A. Reference frames. National report to the International association of geodesy of the International union of geodesy and geophysics 2011–2014 // International scientific, technical and industrial electronic journal "Geo Science". 2015. № 3. P. 9–21.
  28. **Kaftan V. I.,** Sermiagin R., Zotov L. Gravity field. National report to the International association of geodesy of the International union of geodesy and geophysics 2011–2014 // International scientific, technical and industrial electronic journal "Geo Science". 2015. № 3. P. 22–28.
  29. **Kaftan V. I.,** Gorshkov V. L., Malkin Z. M., Shestakov N., Steblou G. Geodynamics. National report to the International association of geodesy of the International union of geodesy and geophysics 2011–2014 // International scientific, technical and industrial electronic journal «Geo Science». 2015. № 3. P. 29–43.
  30. **Kaftan V. I.,** Malkin Z. M. Common and related problems. National report to the International association of geodesy of the International union of geodesy and geophysics 2011–2014 // International scientific, technical and industrial electronic journal "Geo Science". 2015. № 3. P. 63–68.
  31. **Kaftan V.,** Komitov B., **Lebedev S.** Satellite and terrestrial data analysis of the Caspian Sea Level changes in relation to Cosmo-Geophysical Processes // 26<sup>th</sup> General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) 22 June–2 July, 2015, Prague, the Czech Republic.
  32. **Лебедев С. А.** Спутниковая альтиметрия Белого и Баренцева морей // Программа и тезисы школы-семинара «Современные методы дистанционных исследований и прогноза параметров среды в Арктике», Таруса, 12–14 октября 2015 г. М.: ИКИ, 2015. С. 25–26.
  33. **Лебедев С. А.** Динамика Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии // Тринадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 16–20 ноября 2015, Москва, Россия. С. 28.
  34. **Ishkov V. N.** Development of the current 24 solar cycles (77 months) // Book of Abstracts Seventh Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere", Sunny Beach, Bulgaria, 1–5 June 2015. P. 2 <http://ws-sozopol.stil.bas.bg/>.
  35. **Ishkov V. N.** Solar sunspot-forming activity and its development on the reliable W numbers series // Variability of the sun and sun-like stars: from asteroseismology to space weather. 06–08 July 2015, Baku, Azerbaijan. Programme and Abstract Book. P. 16–17. <http://sdf.gov.az/conferences/sun2015/?page=prog>.
  36. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «ELXPAPER» № 2015615570 от 25.05.2015. Автор **Нечитайленко В. А.**

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

Номер гос. регистрации № 01201456270 (0145-2014-0002)

Руководители проекта гл.н.с., д.т.н. В. Н. Морозов;

зав. лаб., д.т.н. В. Н. Татаринов

#### **3.1. Моделирование напряженно-деформированного состояния и деструкции породных массивов в условиях воздействия высоких температур и тектонических напряжений при подземной изоляции РАО (для условий Нижнеканского массива)**

В рамках решения этой задачи в 2015 г. проводились исследования, направленные на изучение влияния температуры и высокоградиентных полей напряжений на напряженно-деформированное состояние (НДС) породного массива в горных выработках пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО). Было выполнено моделирование влияния температуры и НДС пород на изоляционные свойства приствольных зон скважин, заполненных тепловыделяющими РАО. Моделирование проводилось методом конечных элементов (программа *FEMAP NX NASTRAN*). По границам слоя задано тектоническое поле главных напряжений. Внутри слоя действуют напряжения, создаваемые температурным полем контейнеров с РАО. При проведении расчетов принималось, что ось главного тектонического напряжения  $\sigma_{33}$  направлена вдоль оси ОУ. Вдоль оси ОХ действует напряжение бокового отпора порядка  $1/3\sigma_{33}$ . Значение главных тектонических напряжений  $\sigma_y = 30$  МПа,  $\sigma_x = 10$  МПа.  $T_m(x,y)$  – температура массива, зависящая от координат точек массива. Методика расчета детально изложена в отчетах за предыдущие годы.

На рис. 3.1 показано распределение интенсивности напряжений в приконтурной зоне скважины, а на рис. 3.2 – распределение интенсивности напряжений для группы из 4-х скважин по прошествии 20, 100, 400 лет после захоронения соответственно. Общая концентрация зон повышенных напряжений в области скважин по прошествии 20 лет после захоронения РАО (рис. 3.1б и 3.2б) значительно больше, чем для более длительных периодов. Это связано с более высокими значениями температур в окрестностях скважин. На рис. 3.1б (20 лет после захоронения) приведен наиболее неблагоприятный вариант для одной скважины – интенсивность напряжений 50 МПа, а область влияния доходит до 17 м. При средней температуре «рабочего тела»  $\langle \Delta T \rangle = 50$  °С и радиусе 5 м длина возможной трещины раскрытия может составить 10 м. Таким образом «безопасное расстояние» между скважинами должно быть больше 20 м. Постановка научно-исследовательских работ в условиях подземной исследовательской лаборатории ПГЗРО позволит в дальнейшем получить более корректные данные с учетом реальных условий в породном массиве.

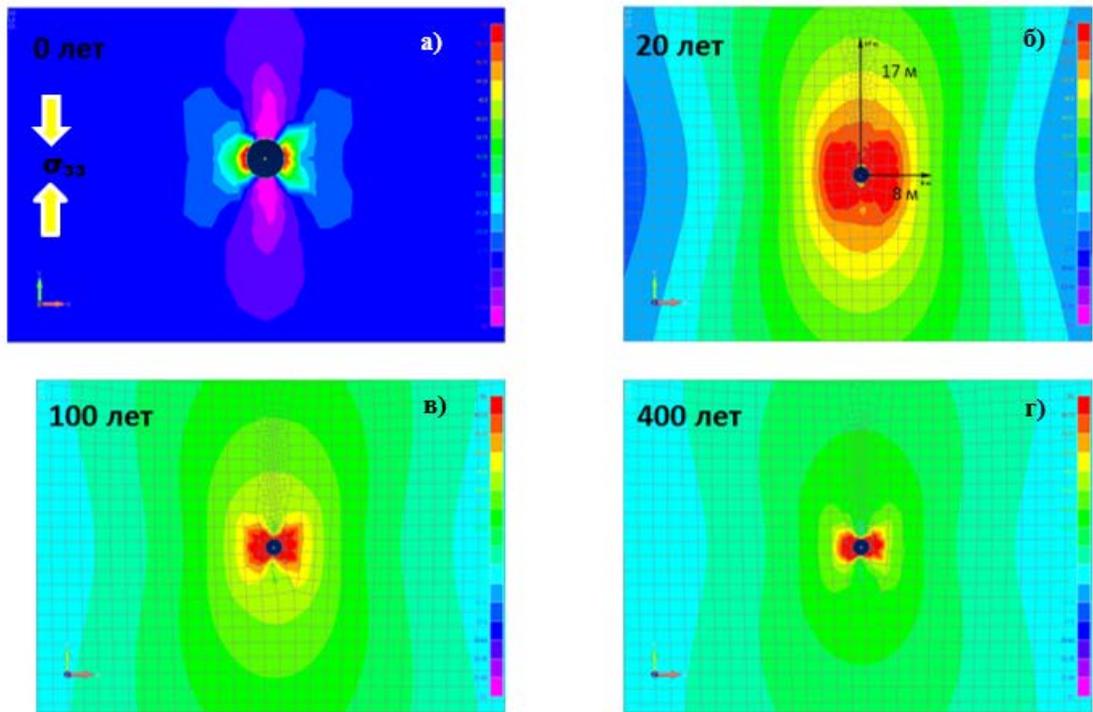


Рисунок 3.1 – Интенсивность напряжений в области скважины в МПа: а) тепловые нагрузки не учитывались; б) 20 лет после захоронения РАО; в) 100 лет после захоронения РАО; г) 400 лет после захоронения РАО

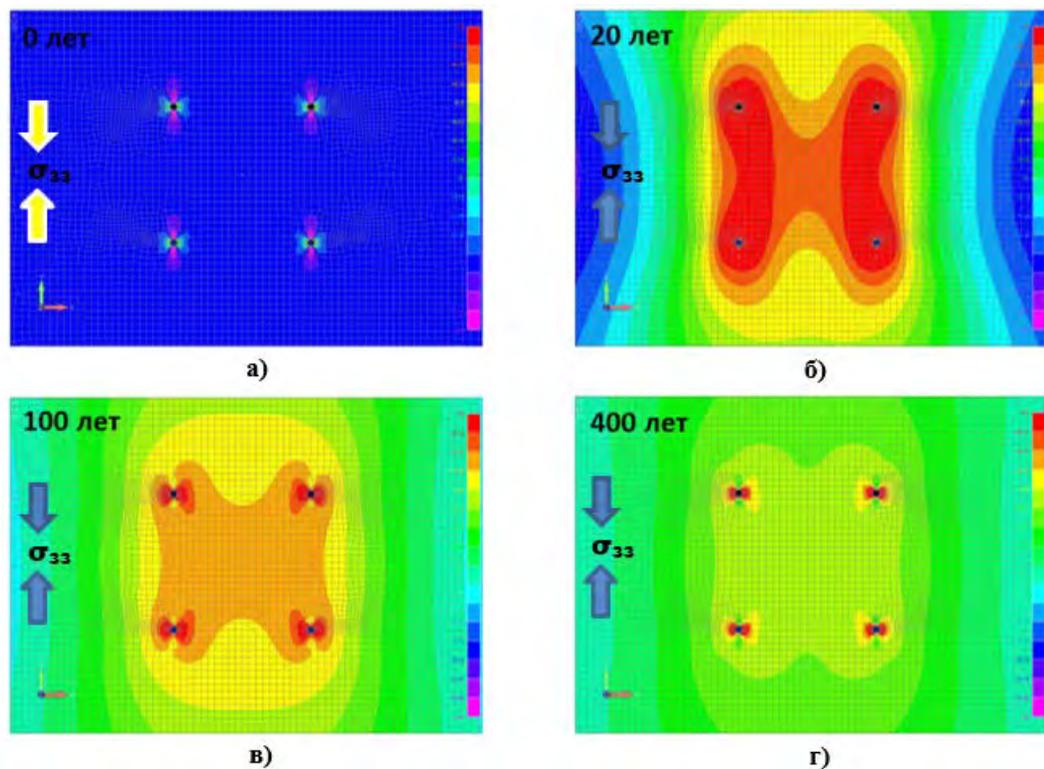


Рисунок 3.2 – Интенсивность напряжений в области скважин в МПа: а) тепловые нагрузки не учитывались; б) 20 лет после захоронения РАО; в) 100 лет после захоронения РАО; г) 400 лет после захоронения РАО

### **3.2. Разработка расчетно-программных модулей для определения напряженно-деформированного состояния в изгибаемых пластинчатых блоках геологической среды при заданных прогибах точек контура и действии мгновенных энергетических импульсов**

Исследования по данной задаче были продолжением работ, начатых в 2014 г. На основе общего решения в явном аналитическом виде было получено приближенное решение для задачи изгиба свободно-опертой прямоугольной пластины Кирхгоффа при задании в точках контура значений функции прогиба. В предельном случае (при неограниченном увеличении числа точек контура) полученные бесконечные ряды равномерно сходятся в замкнутой области пластины. Важным аспектом полученных решений является обеспечение условий их улучшенной реализуемости при конечном числе членов в спектральных разложениях.

Были проанализированы 5 комбинаций распределения заданных прогибов по контуру пластины. Теоретические и вычислительные свойства сформированных неалгебраических функций формы составляют полный базис явного представления решения для задачи изгиба тонкой прямоугольной пластины Кирхгоффа от действия заданных прогибов точек контура в граничных узлах.

Разложение по системе введенных функций формы по сравнению с рядами Фурье и степенными рядами показало следующие достоинства:

- Для одного и того же числа членов разложения на основе построенных функций (без учета функций, связанных с точками границы) существенно сглаживают явление Гиббса по сравнению с рядами Фурье.
- В случае полного базиса построенных функций явление Гиббса устраняется полностью.
- Разложение по построенному базису функций формы является «гибким» по сравнению с рядами Фурье («жесткое» разложение).
- Построенные разложения в отличие от рядов Фурье обладают интерполяционными свойствами на множестве равноотстоящих узлов.
- В построенных разложениях в качестве констант используются сами значения решения в точках сетки (подобно разложениям по кардинальным функциям Уиттакера).
- По сравнению со степенными рядами на сетке равноотстоящих узлов для построенных представлений отсутствует явление Рунге (неограниченного роста ошибки интерполяции в окрестностях граничных точек).

Важным достоинством полученного в работе решения является учет угловых прогибов пластины, что является существенным результатом при решении бигармонической проблемы в прямоугольных областях. С математической (и практической) точки зрения это означает, что при неограниченном росте числа узлов построенные ряды равномерно сходятся в замкнутой области. Следовательно, для того,

чтобы увеличить точность расчета, достаточно просто задать большие значения числа граничных узлов.

Приведенные результаты расчета носили проверочный характер. Эти результаты свидетельствуют как о точном удовлетворении граничных условий задачи изгиба при заданных прогибах, так и о достоверном характере полученного решения при задании различных комбинаций функций граничных прогибов.

### **Основные выводы**

Построенные разложения по полным системам неалгебраических функций формы обнаруживают преимущества в теоретическом и вычислительном интерполяционном аспекте перед классическими разложениями в форме степенных рядов и рядов Фурье (отсутствие явления Рунге и эффекта Гиббса);

Анализ результатов расчета свидетельствует о точном выполнении граничных условий и достоверном характере полученного решения;

В случае гладкого задания граничных прогибов отсутствуют участки пограничных слоев, что приводит к плавному изменению искомого решения и отсутствию опасности локального разрушения в области пластины.

Таким образом, особый интерес вызывают случаи резкого локального изменения заданных прогибов при учете ненулевых значений прогибов в угловых точках пластины. Поэтому следующим этапом проводимого исследования влияния заданных прогибов на напряженно-деформированное состояние в пластине планируется задание быстроизменяющегося характера изменения прогибов и исследование пограничных слоев, где имеют место большие градиенты решения и существует возможность локального разрушения.

### **3.3. Комплексная геолого-тектоническая интерпретация данных наблюдений за современными движениями земной коры на геодинамическом полигоне ФГУП «ГХК» на основе спутниковой GPS/ГЛОНАСС-технологии и построение геодинамических моделей для зоны контакта главных тектонических структур региона – Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты**

В пределах пункта ПГЗРО (радиус 15 км) в течение ряда лет проводились наблюдения за современными движениями земной коры (СДЗК) на основе использования глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. Мониторинг СДЗК был начат в 2010 г. (эпоха 0, наблюдения проводились только на 10 пунктах в пределах участка «Енисейский»), затем был продолжен в 2012–2014 гг. (эпоха 1, эпоха 2, эпоха 3) на геодинамическом полигоне в пределах пункта размещения объектов ФГУП ФЯО «ГХК». В июне 2015 г. был проведен очередной – пятый цикл наблюдений (эпоха 4), кроме этого было установлено 2 новых пункта 1501, 1502 (рис. 3.3). По результатам

наблюдений были рассчитаны координаты пунктов наблюдений на эпоху 4 – июнь 2015 г., длины базисных линий между пунктами и выполнено уравнивание сети.



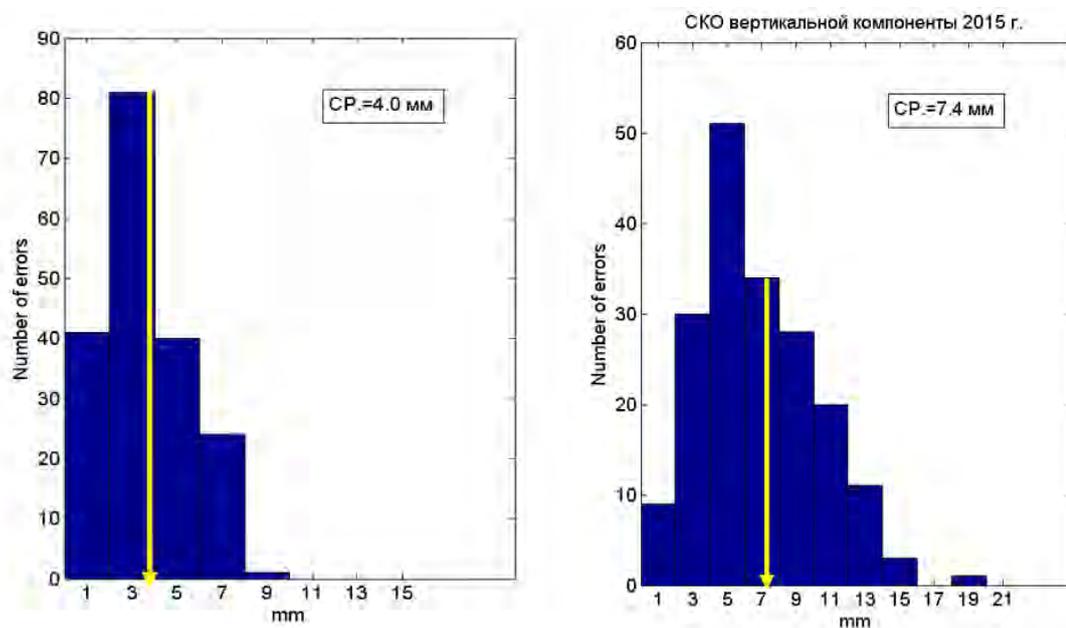
**Рисунок 3.3 – Внешний вид нового пункта № 1501**

Распределение СКО положения пунктов в плане и по высоте из уравнивания эпохи 2015 года представлено на рис. 3.4. Гистограмма показывает, что основная масса СКО в плане группируется в области 4,0 мм, а по высоте – в области 7,2 мм

На рис. 3.5 показаны скорости изменения длин базисных линий  $\Delta L$  за интервал наблюдений 2010–2015 г. На всей правобережной части в период с 2010 по 2013 год линии укорачивались, т.е. существовала тенденция к сжатию, а в левобережной части – наоборот, почти все линии увеличивали длину, т.е. среда испытывала растяжение. Через год картина сменилась на противоположную. На правом берегу зарегистрированы растяжения, на левом – сжатие. Затем, в последнюю эпоху наблюдений (2014–2015 гг.), левый берег фактически полностью вернулся к режиму, существовавшему до 2013 г., а правый только частично, так как помимо укорочения половина линий все еще имеет тенденцию к удлинению. Можно предположить, что было зарегистрировано явление, которое является следствием циклического развития тектонических процессов в регионе как в пространстве, так и во времени. Это подтверждает устоявшееся в литературе мнение геологов-тектонистов, что разломные зоны, пространственно связанные с руслом р. Енисей, активны и делят регион на две тектонические провинции, испытывающие горизонтальные движения разной направленности.

Наиболее вероятной причиной резкого увеличения величин  $\Delta L$  в 2014 г. скорее всего является известное фундаментальное свойство земной коры (которое описывали известные ученые В. И. Гзовский, М. А. Садовский, В. Е. Хаин и др.) – циклический характер развития геодинамических движений во времени, когда относительно длительные периоды затишья сменяются короткими периодами интенсификации движений. Подавляющее большинство линий, для которых получены в 2014 г. большие

изменения, связаны с пунктами, расположенными на берегу р. Енисей и в непосредственной близости к Муратовскому разлому. Это пункты 1205, 1204, 1206, 1214, 1215, 1216.



**Рисунок 3.4 – Распределение средних квадратических ошибок положения пунктов в плане и по высоте для эпохи 2015 г.**

Рис. 3.5 показателен тем, что среднегодовые скорости  $\Delta L$  для пунктов, на которых проводились наблюдения в течение длительного интервала времени, существенно ниже, чем для пунктов, где наблюдения проводились в течение 1-2 лет. Такими линиями являются линии, связывающие пункты 1402, 1301 с другими пунктами. В целом же полученные данные позволяют утверждать, что среднегодовые скорости СДЗК позволяют отнести район к относительно спокойным в геодинамическом плане. Эти выводы согласуются с хорошо известными геоморфологическими особенностями региона. Енисейский кряж четко делит территорию на две провинции – спокойную левобережную и воздымающуюся правобережную. В этом случае становится необходимым анализ данных повторного нивелирования по профильным линиям, ориентированным с запада на восток, которые по идее должны подтвердить факт смены знаков движений в районе, прилегающем к р. Енисей. Проведение повторных GPS/ГЛОНАСС наблюдений позволяет выйти на оценку градиентов смещений, построенных с учетом пространственно-временного эффекта.

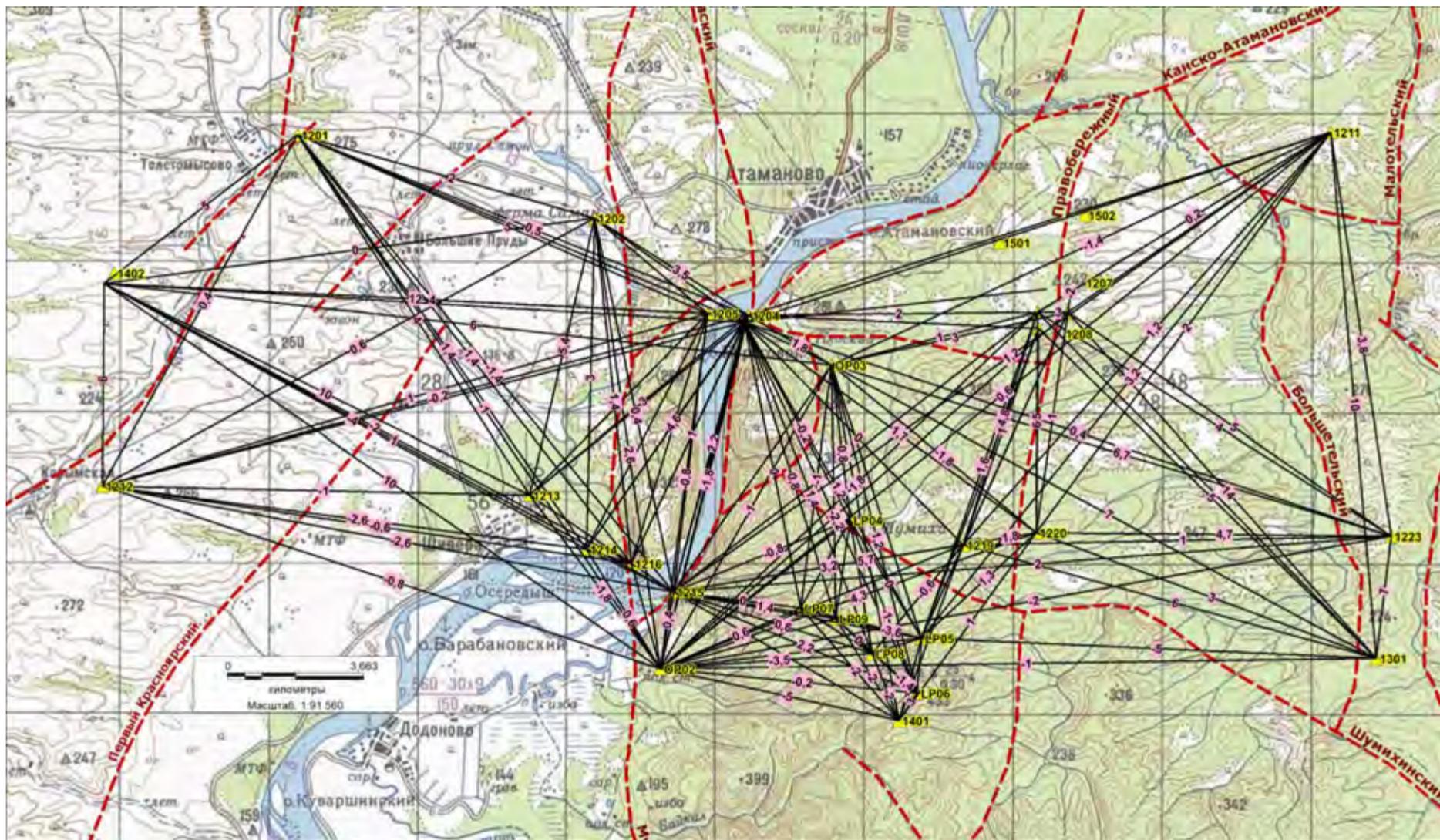


Рисунок 3.5 – Скорости изменения длин базисных линий ( $\Delta L$ ) за весь интервал наблюдений с 2010 по 2015 г.

### **3.4. Исследование систематических ошибок при геодинимическом мониторинге средствами ГНСС с целью поиска путей повышения точности контроля движений и деформаций на локальных геодинимических полигонах, включая объекты ядерного топливного цикла**

При изучении и контроле устойчивости инженерных сооружений и естественных объектов большое внимание уделяется непрерывному мониторингу с использованием средств современных спутниковых радионавигационных измерений (ГНСС). До недавнего времени контроль взаимного положения пунктов земной поверхности с целью регистрации геодинимических явлений осуществлялся в основном с частотой один раз в сутки. Задачей настоящего исследования является изучение периодических изменений в приращениях координат локальных сетей мониторинга инженерных сооружений и земной поверхности с частотой колебаний один раз в сутки и выше.

Для надежного выявления скрытых периодичностей в результатах спутниковых определений были использованы три качественно различных метода:

- вейвлет-преобразование (вейвлет-функция Морле);
- быстрое преобразование Фурье (БПФ);
- последовательный анализ доминирующих гармоник.

Наиболее показательными для качественной визуальной оценки наличия периодических компонент являются результаты анализа с использованием вейвлет-преобразования. На рис. 3.6 приведен результат вейвлет-анализа в изменениях восточной компоненты dE вектора базовой линии длиной 4,3 км. Можно видеть, что в изменениях этих значений явно выражено колебание с периодом в одни сутки.

Результаты определения спектров колебаний получены тремя указанными выше методами. Для всех векторов базовых линий получено их хорошее взаимное согласование. Пример согласования спектров, полученных разными методами, представлен на рис. 3.7. Можно видеть, что наиболее ярко и главным образом в плановых компонентах выражены суточная и полусуточная волны, в высотных компонентах имеются также и другие периодичности, как более высоких, так и низких частот. Амплитуды колебаний достигают 4 мм.

В случае высокочастотных гармоник БПФ демонстрирует их наличие, в ряде случаев, ложное, достаточно близко к частоте Найквиста, что характерно для этого алгоритма. Поэтому главное внимание было уделено двум основным гармоникам спектра: суточной и полусуточной.

В результате анализа были выявлены суточные и полусуточные периодичности для каждой из координат. В таблице 3.1 представлены периоды колебаний для восточной компоненты.

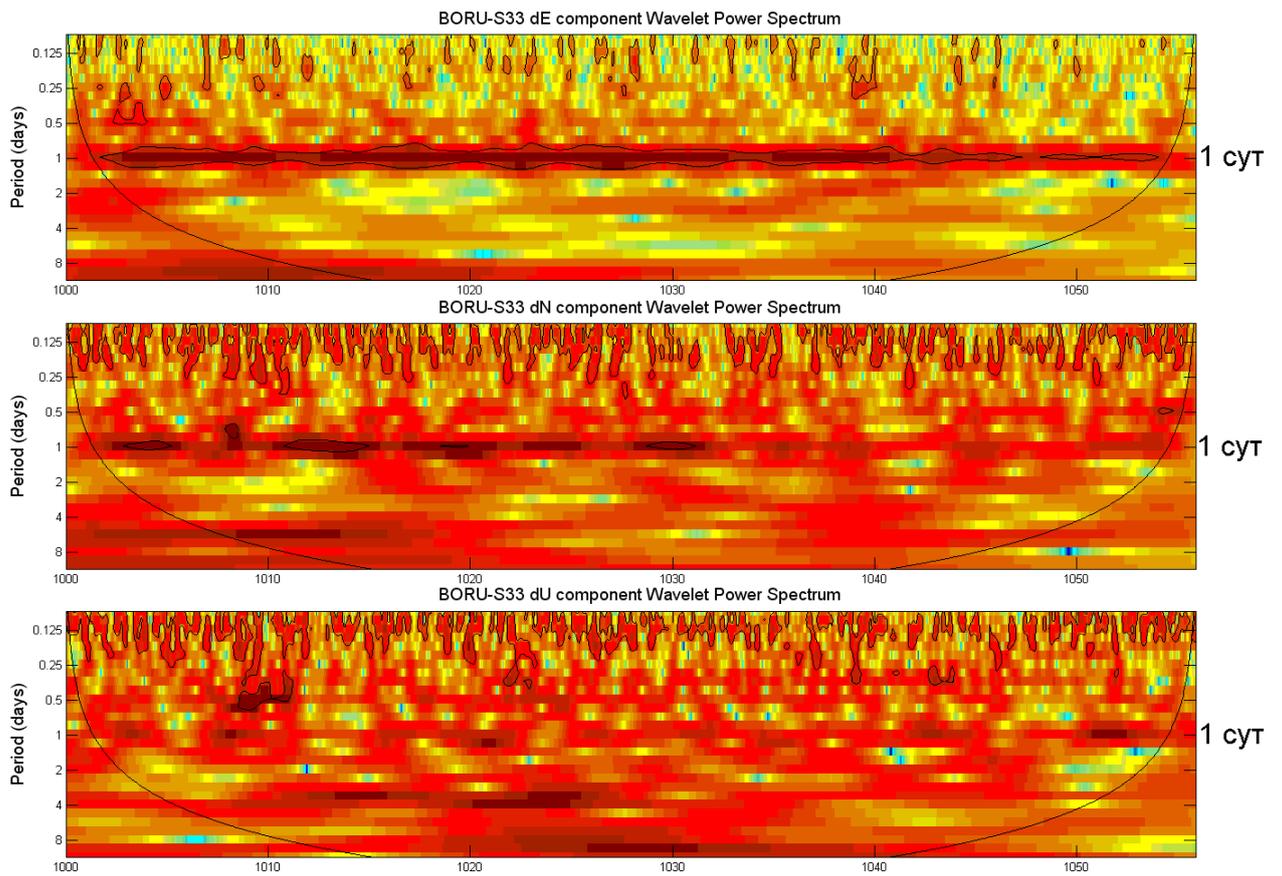


Рисунок 3.6 – Вейвлет-преобразование временных рядов приращений координат dE, dN и dU (сверху вниз) базовой линии контрольной сети длиной 4,3 км

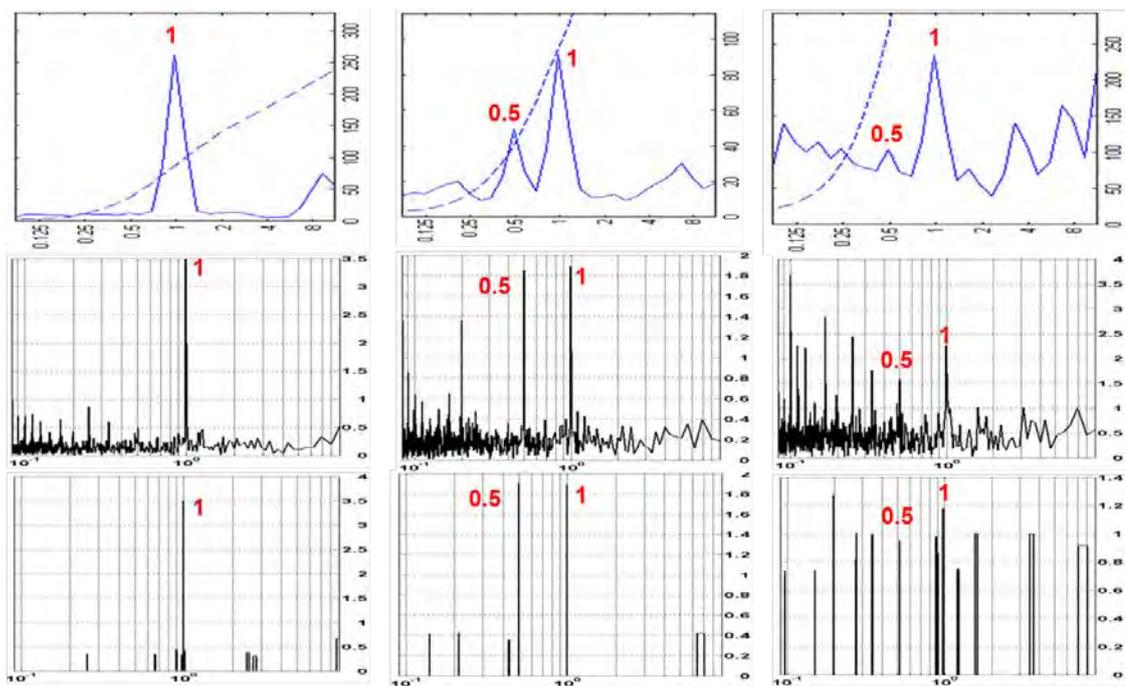


Рисунок 3.7 – Сопоставление спектров колебаний в изменениях приращений координат базовой линии длиной 4,1 км. Слева направо: dE, dN, dU. Сверху вниз: вейвлет-анализ, БПФ, доминант-анализ

**Таблица 3.1 – Сравнение выявленных периодов и амплитуд колебаний с теоретическими (восточная компонента)**

Линия	БПФ		Доминант-анализ		Прилив	Период обр. GPS	Ионосфера
	T(сут)	A (мм)	T $\pm$ m <sub>T</sub> (сут)	A $\pm$ m <sub>A</sub> (мм)			
Boru-S33	0.9985	3.94	0.9991 $\pm$ 0.0003	3.95 $\pm$ 0.11	0.9958 K1 <b>0.5000 S2</b>	0.9972	<b>1.0000</b>
	0.4993	0.93	0.5008 $\pm$ 0.0002	1.14 $\pm$ 0.11		0.4986	<b>0.5000</b>
Boru-S45	0.9985	3.18	0.9996 $\pm$ 0.0004	3.20 $\pm$ 0.13	0.9958 K1 <b>0.5000 S2</b>	0.9972	<b>1.0000</b>
	0.4993	1.21	0.5004 $\pm$ 0.0002	1.29 $\pm$ 0.12		0.4986	<b>0.5000</b>
Boru-Left	0.9985	3.49	0.9993 $\pm$ 0.0004	3.50 $\pm$ 0.13	0.9958 K1 <b>0.5000 S2</b>	0.9972	<b>1.0000</b>
	0.5038	0.48	0.5363 $\pm$ 0.0014	0.26 $\pm$ 0.12		0.4986	<b>0.5000</b>
Left-S33	-	-	1.0027 $\pm$ 0.0026	0.31 $\pm$ 0.08	0.9958 K1 0.5000 S2	0.9972	<b>1.0000</b>
	0.4993	1.19	0.4990 $\pm$ 0.0002	1.20 $\pm$ 0.08		<b>0.4986</b>	0.5000
Left-S45	-	-	1.0099 $\pm$ 0.0032	0.35 $\pm$ 0.11	0.9958 K1 0.5000 S2	0.9972	<b>1.0000</b>
	0.4993	1.74	0.4991 $\pm$ 0.0002	1.75 $\pm$ 0.14		<b>0.4986</b>	0.5000
S45-S33	-	-	0.9959 $\pm$ 0.0078	0.35 $\pm$ 0.11	<b>0.9958 K1</b> <b>0.5000 S2</b>	<b>0.9972</b>	1.0000
	0.5010	0.62	0.4985 $\pm$ 0.0010	0.71 $\pm$ 0.11		<b>0.4986</b>	<b>0.5000</b>
1-2	1.1028	0.18	1.2340 $\pm$ 0.0262	0.24 $\pm$ 0.13	0.9958 K1 <b>0.5000 S2</b>	0.9972	<b>1.0000</b>
	1.0339	0.23	1.0022 $\pm$ 0.0112	0.41 $\pm$ 0.14			
	0.5013	0.30	0.4947 $\pm$ 0.0030	0.37 $\pm$ 0.14			

Наилучшее совпадение выявленных и теоретических периодов колебаний показано в таблице 3.1 зеленым цветом. Можно видеть, что наибольшее число выявленных периодов совпадает с периодами изменений состояния ионосферы.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. В результатах ГНСС геодинимического мониторинга гидротехнических сооружений и объектов земной поверхности обнаружены устойчивые суточные и полусуточные колебательные компоненты с амплитудами до 4 мм.

2. Показана возможность моделирования этих колебаний с целью их исключения из измеренных значений. Результаты моделирования показывают возможность несущественного повышения точности до 2,6–3 мм в плане и 7 мм по вертикали.

3. Требуется дальнейший анализ причин возникновения выявленных колебаний, которые могут быть вызваны как реальными изменениями контролируемых объектов, так и систематическими ошибками ГНСС измерений. Наиболее вероятным представляется ионосферный фактор. В то же время некоторая часть общего вклада в колебания может быть обусловлена реальными деформациями плотины. При геодезическом мониторинге для ослабления периодических «ошибок» применяют различные методы фильтрации данных, добиваясь гладких траекторий движения. Результаты анализа показывают, что при этом могут быть «выброшены» реальные перемещения (на полученных примерах), которые следует изучать.

В рамках внедрения результатов работ в следующем году планируется оформление результатов НИР в виде РИД, а также оформление внедрения РИДов в производство в виде актов.

В рамках работы по теме были получены авторские свидетельства на 2 РИД, опубликовано 15 статей в рецензируемых журналах (в т.ч. 6 – в журналах, индексируемых WoS и Scopus), издан 1 учебник, а также сделано 7 докладов на международных конференциях.

## Статьи

1. **Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Каган А. И., Пятыгин В. А.** Влияние температуры на изоляционные свойства породных массивов при захоронении радиоактивных отходов // ГИАБ. № 8. 2015. С. 338–345.
2. **Кафтан В. И., Красноперов Р. И.** Геодетические наблюдения на геомагнитных обсерваториях // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. том 55. № 1. С. 123–129.
3. **Kaftan V. I., Krasnoperov R. I.** Geodetic observation at geomagnetic observatories. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015. Vol. 55. No.1. pp. 118–123.
4. **Кафтан В. И., Красноперов Р. И., Тertyшников А. В.** Наблюдения с использованием глобальных навигационных систем на геомагнитных станциях и обсерваториях: прикладные и глобальные аспекты // Гелиогеофизические исследования. Электронный научный журнал. 2015. вып. 12. С. 1–10. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=298>.
5. **Татаринов В. Н., Каган А. И.** Гипотеза развития геодинамического процесса при катастрофическом землетрясении Tohoku-Oki 11 марта 2011 г. // Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле» (International scientific, technical and industrial electronic journal «Geo Science»). № 3. 2015. С. 69–95.
6. **Морозов В. Н., Каган А. И., Татаринов В. Н.** Геодинамические аспекты радиационной безопасности на архипелаге Новая Земля // ГИАБ. № 9. 2015. С. 205–219.
7. **Морозов В. Н., Каган А. И.** К прогнозу устойчивости приствольных зон скважин, содержащих контейнеры с радиоактивными отходами // Горный журнал. № 10. 2015. С. 64–66. DOI:10.17580/gzh.2015.10.12.
8. **Татаринов В. Н., Бугаев Е. Г., Татаринова Т. А.** К оценке деформаций земной поверхности по данным спутниковых наблюдений // Горный журнал. № 10. 2015. С. 27–32. DOI:10.17580/gzh.2015.10.05.
9. **Кафтан В. И., Устинов А. В.** Пути повышения точности локального геодинамического мониторинга средствами глобальных навигационных спутниковых систем // Горный журнал. № 10. 2015. С. 32–37. DOI:10.17580/gzh.2015.10.06.
10. **Гвишиани А. Д., Татаринов В. Н.** Геологическая среда и проблема обеспечения безопасности подземной изоляции РАО // Горный журнал. № 10. 2015. С. 4–5.
11. Родкин М. В., Нго Тхи Лы, **Лабунцова Л. М.** Расширение модели мультипликативного каскада для описания режима повторяемости сильнейших землетрясений применительно к региональной сейсмичности Юго-Восточной Азии // Геофизические исследования. Том 16. № 2. 2015. С. 66–82.
12. **Кафтан В. И., Горшков В. Л., Малкин З. М., Шестаков Н., Стеблов Г.** Геодинамика // Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле» (International scientific, technical and industrial electronic journal “Geo Science”). № 3. 2015. С. 29–43.

13. **Кафтан В. И.**, Малкин З. М., Побединский Г. Г. Отсчетные основы // Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле» (International scientific, technical and industrial electronic journal “Geo Science”). № 3. 2015. С. 9–21.
14. **Кафтан В. И.**, Сермягин Р., Зотов И. Гравитационное поле Земли // Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле» (International scientific, technical and industrial electronic journal “Geo Science”). № 3. 2015. С. 22–28.
15. **Кафтан В. И.**, Малкин З. М. Общие и смежные проблемы геодезии // Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле» (International scientific, technical and industrial electronic journal “Geo Science”). № 3. 2015. С. 63–68.

### **Тезисы и доклады на конференциях**

1. **Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Камнев Е. Н.** Возможности геодинамического моделирования при проектировании и отработке месторождений полезных ископаемых // Международная научно-техническая конференция «Современные инновационные технологии при добыче и переработке полезных ископаемых (робототехника, биотехнологии, безлюдная выемка, пастовая закладка и т.д.)». АО «ВНИПИПромтехнологии», 15–16 апреля, 2015. Москва.
2. **V. Tatarinov, V. Morozov, I. Kolesnikov, A. Kagan, T. Tatarinova** Geodynamic zoning for isolation of radioactive waste // 24 International Mining Congress and Exhibition of Turkey IMCET. 14–17 апреля. 2015. Antalia. 2015.
3. **Татаринов В. Н., Каган А. И., Татаринова Т. А.** Землетрясение Tohoku-Oki – модель напряженного состояния литосферы. Всероссийская научная конференция с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска». 27–30 мая 2015. г. Южно-Сахалинск.
4. **A. V. Basmanov, V. I. Kaftan, R. A. Sermyagin, I. A. Oshchepckov, L. I. Serebryakova, A. A. Spesivcev.** Earth’s surface deformation of Baikal rift zone from the data of 2011–2014 GNSS companies. // 26<sup>th</sup> General Assembly IUGG. 2015. Prague, Czech Republic.
5. **A. Ustinov, V. Kaftan** Diurnal oscillations in local GNSS monitoring // 26<sup>th</sup> General Assembly IUGG. 2015. Prague, Czech Republic.
6. **V. Tatarinov, V. Morozov, T. Tatarinova** Prediction geodynamic safety in the disposal of high-level radioactive waste in geological formations. // GeoBerlin2015 – Dynamic Earth from Alfred Wegener to today and beyond – Abstracts. Annual Meeting of DGGV and DMG, 4–7 October 2015, Berlin: GFZ German Research Centre for Geosciences. P. 366. DOI: 10.2312/GFZ.LIS.2015.003.
7. **Татаринов В. Н., Татаринова Т. А.** Прогнозирование геодинамического риска в районах размещения радиационно-опасных объектов // Международная научно-практическая конференция по проблемам снижения природных опасностей и рисков «ГЕОРИСК-2015». 2015. С. 357–362.

### **Учебники**

1. **Кафтан В. И.** [и др.] Энциклопедия кадастрового инженера. Учебное пособие / Под. общ. ред. М. И. Петрушиной, А. Г. Овчинниковой. — М.: Кадастр недвижимости, 2015. 704 с.

### **Результаты интеллектуальной деятельности**

2. **Каган А. И., Морозов В. Н., Татаринов В. Н.** «Расчет изменения температурного поля породных массивов при подземной изоляции теплоизлучающих радиоактивных отходов (HEAT HLRW)».
3. **Каган А. И., Морозов В. Н., Татаринов В. Н.** «Расчет напряженно-деформированного состояния породного массива под воздействием тектонических и тепловых полей напряжений при подземной изоляции теплоизлучающих радиоактивных отходов (SSS HLRW)».

## **4. Создание и применение новых математических методов в геофизических исследованиях**

Номер гос. регистрации № 115012960029 (0145-2014-0015)

Руководитель проекта гл.н.с., д.ф.-м.н. А. А. Лушников

Проект, поддержанный ФАНО России, направлен на разработку и применение новых математических методов исследования динамики геофизических явлений с целью изучения влияния случайных факторов на ход геофизических процессов, которые описываются динамическими уравнениями со случайными параметрами (стохастические дифференциальные уравнения). Предложены методы введения случайных параметров. Основная идея – описание процесса в терминах вероятностей его реализаций при заданных значениях параметра. Соответствующие дифференциальные уравнения образуют бесконечную систему, анализ и решение которой представляют немалые трудности. Выявлена роль случайных факторов в динамике коллективных процессов, особенно в случаях возникновения неустойчивостей. Созданы методы анализа динамических процессов в глубоко неравновесных системах на основе использования эволюционных уравнений и теории графов, сформулированных в терминах вероятности наблюдения заданного процесса. Это позволит оценивать влияние случайных факторов на протекание любых геофизических процессов.

### **4.1. Цели работы в 2015 г.**

1. Формулировка принципов введения случайных факторов в уравнения, описывающие геофизические процессы, на примере распространения загрязнения на земной поверхности (случайный фактор – скорость распространения загрязнения).
2. Формулировка методов решения соответствующих уравнений и применение этих методов к решению поставленной задачи о случайном распространении примеси.
3. Принципы введения случайных факторов в уравнения распространения электромагнитных полей (случайный фактор – концентрация рассеивателей, их резонансные свойства и влияние на них солнечной активности).
4. Построение пропагаторов электромагнитного поля в случайно-неоднородной среде.

Количество научных публикаций в российских и международных журналах, индексируемых в Web of Science, Scopus, РИНЦ (единиц) – 2.

### **4.2. Случайные факторы в геофизических задачах**

Геофизические данные представляются числовыми массивами размерности  $\Omega$ . Например, одномерные массивы могут представлять данные о размере популяции в заданные интервалы времени, или, например, моменты измерений могут быть выбраны случайно. Важно понимать, что стоит за такими массивами данных.

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 застать 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.

Наша идея состоит в том, что за геофизическими данными стоит некоторый вероятностный процесс. Каждая последовательность данных реализуется с некоторой вероятностью. Этого, однако, недостаточно, чтобы продвинуться вперед.

Будем предполагать, что сам процесс реализуется с некоторой вероятностью. Будем предполагать также, что каждая реализация процесса (зависимость его параметров от времени) управляется некоторыми вполне определенными и хорошо известными уравнениями. Теперь нужно ввести процедуру усреднения по всем реализациям. Сделать это можно по-разному. Например, можно считать, что константы распределены по закону Гаусса. Тогда окончательное решение уравнения можно усреднить по этой вероятности и найти затем любые интересующие нас средние. Можно поступить иначе: 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. Эти должны подбираться из сравнения теоретических заключений с экспериментальными данными.

При таком подходе возникает вопрос о доминанте. Речь идет о записи вероятности реализации данной функции в виде

$$w(N, t) = a\delta(N - N_0(t)) + bw_r(N, t).$$

Здесь  $\delta(x)$  – дельта-функция Дирака. Функция  $\delta$  – доминирующая, второе слагаемое  $w_r$  дает вероятность реализации, размазанную в функциональном пространстве. Если есть доминантный процесс (или несколько доминантных процессов), то необходимо разработать методы выделения доминанты.

### 4.3. Принципы введения случайных факторов

Существует два альтернативных подхода к описанию случайных геофизических процессов. Рассмотрим линейный процесс фотохимического образования аэрозолей, основанный на хорошо известном уравнении

$$\frac{d\bar{n}}{dt} = I(t) - \mu\bar{n},$$

где  $n(t)$  – среднее число образующихся частиц,  $I(t)$  – мощность источника света, и  $\mu$  – скорость гибели частиц. Функция  $I(t)$  – случайная (скажем, за счет модуляции солнечного освещения облаками) с известной вероятностью реализации.

Вероятность найти заданную счетную концентрацию  $n$  в момент времени  $t$  есть

$$W(n, t) = \langle \delta(n - \bar{n}(t)) \rangle,$$

где  $\bar{n}(t)$  удовлетворяет уравнению для произвольной функции  $I(t)$  и  $\langle \dots \rangle$  обозначает усреднение по всем реализациям  $I(t)$ .

Второй подход основан на использовании управляющего уравнения (Master equation). Для вывода такого уравнения рассматривается популяция частиц размера  $N$ . Размер увеличивается на 1 вследствие рождения одной частицы со скоростью  $\kappa N$  и уменьшается со скоростью  $\lambda N$  из-за их гибели. Здесь  $\kappa$  и  $\lambda$  – скорости рождения и гибели.

Вводится условная вероятность  $W_r(N, t)$  застать в точности  $N$  частиц в популяции при условии, что источник находится в состоянии  $r$ . Эта вероятность меняется по четырем причинам:

- Рождение увеличивает популяцию на единицу;
- Вывод из популяции уменьшает число частиц тоже на 1;
- Источник увеличивает число частиц;
- Естественная гибель уменьшает число частиц.

В предположении, что все четыре изменения статистически независимы, и при больших  $N$  имеем:

$$\frac{\partial W_r(N, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial N} \dot{N}_r W_r(N, t) = \sum_s A(s, r) W_s(N, t) - W_r(N, t) \sum_s A(r, s),$$

$$\dot{N}_r = (I_r - \mu N).$$

### 4.4. Линейная модель популяционной динамики

Многочисленные эмпирические исследования демографических процессов выявили много закономерностей, управляющих популяционной динамикой. Собранных данных настолько много, что была издана специальная энциклопедия, где эти данные

систематизированы. Для полного понимания популяционных динамических процессов необходимо иметь компактную модель с небольшим числом констант, объясняющую в общих чертах существующие эмпирические данные. Простейший пример такой модели – это модель Мальтуса, содержащая только две константы – рождаемость и смертность.

Такая модель хорошо описывает демографические процессы на сравнительно коротких временных промежутках. Эта теория линейна по размеру популяции и, конечно, не учитывает эффектов, связанных с перенаселенностью. И тем не менее эта модель очень поучительна в контексте вероятностного подхода, т.к. смертность и рождаемость очень подвержены влиянию внешних условий, а потому могут меняться в течение коротких промежутков времени. При построении полуэмпирических теорий по умолчанию считается, что описание в терминах средних величин вполне достаточно, хотя очевидно, что эти константы весьма изменчивы. Наше рассмотрение ясно показывает, что такой подход слишком примитивен, и со случайностью надо считаться.

Предположим, что рост популяции управляется уравнением Мальтуса

$$\frac{dn}{dt} = \kappa n - \lambda n = \mu n,$$

где  $n(t)$  – средний размер популяции в момент времени  $t$ ,  $\kappa$  и  $\lambda$  – константы скоростей рождения и смерти, а  $\mu = \kappa - \lambda$  – их разность (коэффициент роста популяции). Популяция растет или уменьшается в зависимости от знака  $\mu$

$$n = n_0 e^{\mu t}.$$

Теперь предположим, что коэффициент роста распределен по гауссовскому закону:

$$W(\mu) = A \exp[-a(\mu - \mu_0)^2],$$

где  $A = \sqrt{\pi/a}$  – нормировочный множитель,  $a$  – дисперсионный параметр.

Усредним  $n(t)$  по распределению  $W$  и найдем

$$\bar{n}(t) = A n_0 \int_{-\infty}^{\infty} W(\mu) e^{\mu t} d\mu = n_0 e^{\mu_0 t} e^{t^2/4a}.$$

Таким образом, независимо от величины средней рождаемости, популяция быстро растет. Функция распределения тоже легко находится

$$w(n, t) = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \int_{-\infty}^{\infty} W(\mu) \delta(n - n_0 e^{\mu t}) d\mu.$$

Интегрирование дает логнормальное распределение

$$w(n, t) = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \frac{1}{tn} \exp\left[-\frac{a}{t^2} \ln^2(n/n_0)\right].$$

## 4.5. Размер как случайный фактор

Существующие демографические тренды, характеризующиеся низкой рождаемостью и увеличением продолжительности жизни, ведут к старению населения, что порождает неприятные экономические и бюджетные проблемы. Одна из наиболее значительных проблем при оценке состояния населения – доступность статистической информации о демографических явлениях.

Существует много попыток создания математических моделей, начиная с классической работы Мальтуса, который предполагал линейную зависимость рождаемости и смертности и вывел свой знаменитый экспоненциальный закон, согласно которому население либо экспоненциально растет со временем, либо уменьшается, в зависимости от соотношения скоростей рождения и гибели отдельных особей.

Почти все демографические исследования базируются на рассмотрении временной зависимости среднего размера популяции. При этом молчаливо предполагается, что случайные акты рождения/смерти ведут к пуассоновскому распределению популяций по размерам

$$w_p(n, t) = \frac{\bar{n}^n}{n!} e^{-\bar{n}},$$

где  $\bar{n}(t)$  – средний размер популяции.

Рассмотрение Мальтуса столь примитивно, что кажется, что за ним не может стоять что-то необычное. Но оказывается, что это не так, и статистика популяций сильно отличается от пуассоновской.

Наше исходное уравнение отличается от уравнения Мальтуса. Мы формулируем уравнение для вероятности  $w(n, t)$  найти  $n$  индивидов в популяции в момент времени  $t$  в предположении, что скорости рождения и смерти линейны по  $n$ . Это уравнение имеет вид

$$\frac{dw(n, t)}{dt} = [(n-1)w(n-1, t) - nw(n, t)] + \lambda[(n+1)w(n+1, t) - nw(n, t)].$$

Средний размер популяции связан с  $w(n, t)$  следующим образом:  $\bar{n}(t) = \sum_n n w(n, t)$ .

В соответствии с развиваемой нами идеологией мы применяем подход, основанный на решении и анализе Управляющего уравнения (the Master equation), которое позволяет проследить за эволюцией вероятности  $w(n, t)$  обнаружить заданное число индивидов в популяции в заданный момент времени. Мы показываем, что эта вероятность может быть выражена через полиномы Лагерра и весьма далека от примитивного закона Пуассона. Мы также вывели выражение для этой вероятности через модифицированные функции Бесселя, которое более удобно использовать для асимптотического анализа (большие популяции).

## 4.6. Нелинейные процессы

Приведем несколько примеров геофизических процессов, для которых применимо рассмотрение, предложенное нами в отчетном году:

- Распространение пожаров;
- Рост заболоченных местностей;
- Распространение трещин;
- Турбулентные движения в атмосфере;
- Образование торнадо;
- Рост ареалов распространения эпидемий;
- Рост облачных частиц;
- Нелинейные демографические процессы.

Все эти процессы опираются на общее основание: процесс типа

$$1+1 \rightarrow 1$$

или чуть более общие схемы. Например, турбулентные вихри, сталкиваясь, образуют более крупные вихри, и т.д., пока не образуется один гигантский вихрь, интенсивно поглощающий более мелкие турбулентные пульсации.

#### 4.7. Агрегация

Рассматривается коагуляционный процесс с коагуляционным ядром пропорциональным произведению масс сталкивающихся частиц. В этом случае найдено точное выражение для спектра размеров частиц для произвольного начального спектра.

На основе анализа решения уравнения Смолуховского, описывающего кинетику образования кластеров в верхних слоях атмосферы, обнаружено, что в процессе слияния кластеров происходит удивительное явление – в течение конечного промежутка времени образуется гигантский суперкластер (гель), который, в свою очередь, влияет на кинетику формирования более мелких кластеров (золь).

Спонтанное формирование геля из золя носит название золь-гель перехода. Это фазовый переход второго рода, роль параметра порядка в котором играет масса геля, строго равная нулю в докритической области. Оказывается, вблизи критической области масса и другие моменты распределения кластеров по размеру ведут себя как степенные функции разности между текущим и критическим временем, причем соответствующая зависимость разная до и после критического момента. Соответствующие показатели степенных зависимостей носят название критических. В довольно общих случаях эти показатели универсальны, и их значения определяются общими законами сохранения или связями соответствующих параметров, следующих из динамики процесса. Так, например, распределение по массам имеет показатель  $\lambda = 5/2$ . Такое распределение вытекает из закона сохранения потока массы. Однако иногда происходит нарушение этих законов. Оказывается, что вышеупомянутый закон применим к случаю экспоненциально убывающих начальных условий. Если эти условия степенные, то показатели степени начинают зависеть от устройства начальных условий. При этом процесс образования

суперкластеров может идти по-разному, в зависимости от величины второго момента начальной функции распределения. Если второй момент существует, то суперкластер образуется через конечный промежуток времени, величина которого обратно пропорциональна второму моменту. Если начальное распределение имеет пологий степенной хвост, то гигантский суперкластер образуется с самого начала коагуляционного процесса. В конечном итоге, найдено явное решение проблемы объединения больших информационных кластеров при произвольных начальных условиях. С использованием этих решений проанализирован эффект влияния начальных распределений кластеров, имеющих степенные хвосты при больших размерах кластеров. Введен показатель  $\rho$ , задающий класс начальных условий степенного типа. Такой показатель вводится с помощью формулы для начального условия  $c_g(0)$ :  $g^{-\varepsilon\rho-1}$ . Так как принципиальным моментом всего теоретического рассмотрения на этот параметр наложено ограничение  $\rho > 1$ , показано, что для  $\rho > 3$  должно реализоваться ординарное поведение функции распределения кластеров по массам. Серьезные изменения происходят только в интервале  $1 < \rho < 3$ . При этом реализуются два разных режима: при  $1 < \rho < 2$  фазовый переход реализуется с самого начала процесса слияния. При  $2 < \rho < 3$  образование гигантского кластера начинается после конечного промежутка времени, однако сам процесс описывается аномальными скейлинговыми функциями. Разработан метод вычисления таких функций. В обоих случаях для больших масс кластеров и малых отклонений от критической точки возможно скомбинировать две переменные  $g$  и  $t - t_c$   $x = g |t - t_c|^{1/\sigma}$  таким образом, что определенным образом перенормированная концентрация  $g^\tau c_g(t)$  зависит только от  $x$ . С другой стороны, в общем виде показано, что для фиксированной величины отклонения от критической точки и  $t > t_c$ ,  $g \rightarrow \infty$ ,  $c_g(t)$  ведет себя как  $g^{-\tau_0}$ , где

$$\tau_0 = \frac{\lambda + 3}{2},$$

и  $\lambda$  – степень однородности коагуляционного ядра. Поэтому естественно предположить, что и в общем случае  $\tau = \tau_0$ . Более того, все известные точно решаемые модели, в которых реализуется образование гигантских кластеров, подтверждают это предположение.

Скейлинговое соотношение между  $\sigma$  и  $\tau$  задаваемое как

$$\sigma = 1 + \lambda - \tau$$

подтверждается также и численными расчетами. В обоих вышеупомянутых случаях величины  $\tau$  и  $\sigma$  определяются только через параметры начального распределения. Что касается показателя  $\tau$ , то он сильно отличается от 1.

Наконец нашел точное подтверждение факт, что посткритическое поведение спектра кластеров описывается законом  $g^{-5/2}$ . Разница между асимптотическим и скейлинговым поведением спектра имеет принципиальный характер.

Выведено большое число явных формул для первого и второго моментов кластерных спектров, что может оказаться полезным при обработке данных измерений магнитных полей.

#### 4.8. Пространственные случайные факторы

Можно ввести диэлектрическую проницаемость и задавать вероятность ее реализации  $w(\varepsilon, r, t)$ . После этого можно усреднять по всем реализациям фотонный пропагатор (функцию Грина векторного волнового уравнения). Зависимость пропагатора от  $\varepsilon$  в данной точке считается известной. Трудность возникает из-за того, что диэлектрическая проницаемость положительна (она становится комплексной, если среда поглощающая). Поэтому гауссовское распределение не может считаться хорошим кандидатом на роль такой вероятности. Однако, можно использовать вариант теории возмущений, в котором электромагнитная волна распространяется в среде с пространственно постоянной диэлектрической проницаемостью, а неоднородность мала по абсолютной величине, и ее можно считать распределенной по гауссовскому закону. Такой подход известен. Конечно, он не работает, если рассеивающая компонента имеет резонансные слагаемые. Этот случай представляет особый интерес при рассмотрении распространения электромагнитных волн в условиях нижней ионосферы (80–100 км). Другой выбор модельного распределения свойств – это логнормальное распределение. Такой подход еще не использовался и нет ясности, насколько он перспективен.

При распространении в однородной среде электромагнитная волна описывается плоской волной

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{A}_0 e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)}.$$

Здесь  $\mathbf{k}$  – волновой вектор,  $c$  – скорость света и  $\omega$  – частота. При свободном распространении  $\omega = ck$ . В результате перерассеяния на случайных неоднородностях появляются волны, двигающиеся в разных направлениях.

Мы рассматриваем простейшую ситуацию: плоская волна движется свободно и случайным образом меняет направление (меняется направление волнового вектора). Уравнение для вероятности найти плоскую волну с заданной фазой дается выражением

$$\frac{\partial W}{\partial t} - \frac{\omega}{ck} \mathbf{n} \frac{\partial W}{\partial \mathbf{r}} = -\frac{W}{\tau} + \sum_{\mathbf{n}'} B(\mathbf{n}, \mathbf{n}') W(\mathbf{n}', t).$$

Здесь  $\mathbf{n} = \mathbf{k}/k$  – направление распространения световой волны и

$$\tau = 1 / \sum_{\mathbf{n}'} B(\mathbf{n}', \mathbf{n})$$

характерное время изменения направления движения. Матрица  $B$  характеризует скорости переходов из состояния  $\mathbf{n}$  в состояние  $\mathbf{n}'$ . Эта матрица должна определяться из независимых соображений. В случае дискретных рассеивателей коэффициенты  $B$  выражаются через сечение рассеяния световой волны на заданный угол.

Сформулированное нами уравнение имеет более общий смысл и описывает любые случайные среды с резкими границами раздела.

Флуктуационные явления в магнитосфере Земли характеризуются различными временами: от суток до долей секунды. В этом разделе рассматриваются короткопериодные флуктуации, вызванные наличием коллективных электромагнитных колебаний, связанных с распространением электромагнитных волн в верхних слоях атмосферы. Это могут быть флуктуации, связанные с турбулентностью и вызванными ею флуктуационными токами, рассеянием и переизлучением электромагнитного поля плазмозольными частицами, присутствие которых приводит к появлению специфических колебаний, связанных с перезарядкой плазмозольных частиц. В этом разделе сообщается о результатах недавней работы, выполненной в рамках проекта.

Дисперсный материал поставляется в верхние слои атмосферы за счет доставки пылевых частиц (микрометеориты) из космоса либо в результате сгорания метеоритного материала при входе в достаточно плотные слои атмосферы. Пары нелетучих веществ, образующихся при сгорании, конденсируются и образуют аэрозольные частицы. Спектры электромагнитных флуктуаций зависят от распределения плазмозольных частиц в атмосфере. Этот факт общепринят и известен уже несколько десятков лет. Хотя поток метеоритного вещества к земной поверхности известен, механизмы, отвечающие за образование частиц дисперсной фазы, еще недостаточно изучены.

#### **4.9. Геофизические процессы с участием аэрозолей**

Рассмотрим геофизические процессы с участием аэрозолей. Аэрозоли и облака являются основными факторами, влияющими на радиационный бюджет Земли и климат. При отсутствии облаков аэрозоли управляют экстинкцией радиации. В достаточно влажной атмосфере аэрозоли могут действовать как ядра конденсации и льдообразования и влиять таким образом на альбедо земной атмосферы и потребление солнечной энергии земной поверхностью. Химический состав аэрозолей и их химическая активность определяют кислотность и химический состав малых газовых примесей, что в свою очередь влияет на процессы образования и роста вторичных аэрозолей. Итак, аэрозоли играют важную роль в формировании погодных и климатических условий, а также качества воздуха, они взаимодействуют с многими компонентами атмосферы и биосферы и являются, таким образом, одним из важнейших факторов, которые необходимо изучать для правильного понимания глобальных атмосферных изменений в атмосфере Земли.

Общая цель исследований атмосферных аэрозолей – усовершенствование понимания их роли в механизмах воздействия на атмосферу и предсказание глобальных изменений климатических условий на Земле. Для достижения этих целей необходимы серьезные усилия в моделировании и экспериментальных исследованиях атмосферных аэрозольных процессов.

До сих пор все существующие модели оперировали (и продолжают оперировать) детерминистическими уравнениями, описывающими средние поля аэрозольных концентраций. Между тем атмосфера – принципиально стохастическая среда, где роль

случайных факторов не может быть пренебрежимо малой. Цель проекта – исследовать влияние атмосферных флуктуаций на кинетику аэрозольных процессов.

Атмосфера – принципиально стохастическая система. Параметры, существенно влияющие на аэрозольное состояние атмосферы, такие как температура, интенсивность солнечной радиации (особенно в УФ диапазоне), концентрации малых газовых примесей не могут быть заменены их средними значениями. К примеру, солнечная радиация зависит от облачности, которая меняется случайно как в пространстве, так и во времени. В то же время скорости внутриатмосферных фотохимических процессов связаны с УФ радиацией, интенсивность которой может быть полностью подавлена облаками.

Итак, вместо формулирования управляющих уравнений для средних, предпочтительнее вводить вероятность обнаружения заданного набора параметров в заданный момент времени. Следующий шаг – решение сформулированных уравнений.

До настоящего времени не предпринималось попыток стохастического моделирования атмосферы. Не существует даже грубых оценок влияния атмосферных флуктуаций на динамику аэрозольных процессов, хотя атмосферные аэрозоли должны быть наиболее чувствительны к флуктуациям атмосферных параметров. Например, даже незначительные изменения концентраций газов, из которых образуются аэрозольные частицы, могут менять скорости образования частиц на порядки.

Не менее важно рассмотрение процессов взаимодействия отдельных частиц с атмосферой, таких как испарение и рост частиц, захват частицами малых газовых примесей, обмен энергией с атмосферой. Эти исследования включены в проект.

Аэрозольное состояние атмосферы характеризуется полем концентрации аэрозольных частиц. В противоположность общепринятому подходу, который предполагает введение средней концентрации и эволюционного уравнения для этого поля, мы вводим вероятность застать данное аэрозольное состояние в заданный момент времени и формулируем уравнение для этой вероятности. Ожидается, что это уравнение будет содержать вариационные производные, а его структура будет напоминать уравнение Фоккера-Планка.

Другой подход основан на уравнении Ланжевена. Стохастический фактор вводится в классические кинетические уравнения. Например, можно рассмотреть формальные уравнения химической кинетики со случайной константой скорости реакции.

Третий подход использует метод Монте-Карло для моделирования случайных аэрозольных процессов

#### **4.10. Основные результаты**

1. Разработаны новые математические методы исследования динамики изменения электромагнитного состояния атмосферы (от тропосферы до ионосферы). Основная идея – это применение современных подходов, заимствованных из теории многих тел и теории поля. Новым является кинетический подход и уравнение для вероятности найти заданную фазу электромагнитной волны, распространяющейся в случайной среде.

2. Выявлено влияние аэрозоля на прохождение электромагнитных волн в верхней атмосфере. Исследована возможность возникновения новых электромагнитных мод в запыленных газовых средах. В частности, построена теория взаимодействия заряженной частицы атмосферного аэрозоля с электромагнитным полем. Найдены собственные частоты колебаний электронного облака вокруг частицы. Показано, что рассеяние волн на этих частотах усиливается плазменными резонансами.
3. Исследованы механизмы образования тропосферных частиц. Построены и исследованы модели возникновения этих частиц. Показано, что при соответствующем выборе параметров источников низколетучих атмосферных компонентов такие модели способны правильно воспроизводить концентрации и эволюцию распределения по размерам этих частиц. Сами модели допускают рандомизацию, т.е. введение фактора случайности.
4. Разработаны методы анализа динамических процессов в глубоко неравновесных системах на основе использования эволюционных уравнений, сформулированных в терминах вероятности наблюдения заданного процесса. Этот новый подход позволяет оценивать влияние случайных факторов на протекание любых геофизических процессов. В частности, рассмотрена эволюция дисперсной системы, дисперсные включения которой способны к слиянию. Исследована асимптотическая стадия процесса. Впервые установлены параметры скейлинговых режимов в системах с распределенными начальными условиями. Анализ основан на впервые предложенном выражении для спектра масс, которое само по себе представляет существенный вклад в теорию эволюции глубоко неравновесных систем.
5. Разработан новый метод анализа случайных временных рядов с использованием идей дискретного математического анализа. Создана численная схема для анализа нерегулярных множеств моментов наступления событий.
6. В 2015 году опубликованы шесть статей по тематике проекта в ведущих российских и международных журналах. Две из них написаны в рамках обязательств по проекту.

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

Номер гос. регистрации № 115021010261 (0145-2014-0014)

Руководитель проекта гл.н.с., д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова

Предложен новый метод реконструкции скорости солнечного ветра по длинным рядам геомагнитных данных высокоширотных обсерваторий. Показано, что высокоскоростные потоки солнечного ветра вызывают магнитосферные суббури наибольшей интенсивности, и в высокоширотной ионосферной токовой системе доминирует суббуревой западный электроджет (westward auroral electrojet, WEJ). Мы предложили новый метод реконструкции среднегодовых значений скорости солнечного ветра по геомагнитному параметру, который является индикатором интенсивности электроджета. По данным полярной обс. Годхавн (GDH) и авроральной обс. Соданкюля (SOD) мы рассчитали значения скорости с 1914 г. За период спутниковых измерений коэффициент корреляции между скоростью солнечного ветра и интенсивностью электроджета превосходит коэффициенты для всех предложенных ранее функций геомагнитных параметров. Анализ наиболее длинных существующих рядов геомагнитных наблюдений в высоких широтах показал, что экстремальное событие высокоскоростных потоков солнечного ветра (ВСП СВ), сравнимое по мощности с событием 2003 г., произошло на спаде солнечного цикла 18 в 1952 г. Последующий высокий солнечный максимум цикла 19 был вершиной современного 100-летнего солнечного «гранд-максимума». Тот факт, что удалось обнаружить экстремальные ВСП в 1952 г., является экспериментальным подтверждением современной теории солнечного динамо, в рамках которой цикличность солнечной активности интерпретируется как последовательное преобразование полоидальной и тороидальной конфигурации магнитного поля Солнца. Изменение тороидального поля происходит в фазе с изменением числа солнечных пятен, и эволюция этого поля прослеживается на большом интервале времени. Полоидальное поле изменяется приблизительно в противофазе с тороидальным полем и его интенсивность обуславливает высокоскоростные потоки, исходящие из коронарных дыр. Среднегодовая скорость солнечного ветра является индикатором величины полоидального поля, но прямые измерения скорости начались только в середине 1960-х годов. Полученные результаты впервые дают экспериментальное подтверждение того, что на пике «гранд-максимума» мощному тороидальному полю 19-го солнечного цикла предшествовало не менее мощное полоидальное поле 18-го цикла.

Прямые спутниковые измерения параметров межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра (СВ) осуществляются с середины 1960-х несколькими поколениями спутников. Реконструкция значений ММП и СВ в доспутниковую эпоху возможна только по косвенным данным. Геомагнитная активность является наиболее точным индикатором солнечной активности. Однако реконструкция параметров солнечной активности по геомагнитным данным является нетривиальной задачей. Попытки реконструкции предпринимались неоднократно, в основном по данным

среднеширотных обсерваторий. Результаты оказывались весьма приблизительными, особенно это касалось недооценки максимальных значений скорости фазы на спаде солнечных циклов. Мы предложили и физически обосновали новый метод реконструкции скорости солнечного ветра ( $V_{св}$ ) по длинным рядам геомагнитных данных высокоширотных обсерваторий. Этот метод позволяет реконструировать  $V_{св}$  с большей точностью и, как показывает сравнение с данными прямых измерений за последние 50 лет, адекватно воспроизводит экстремальные значения  $V_{св}$  в каждом солнечном цикле.

### **5.1. Соотношение между долгопериодными геомагнитными вариациями и высокоскоростными потоками**

В высоких широтах северного полушария есть две уникальные обсерватории, имеющие еще более длинные ряды наблюдений. Полярная обсерватория Годхавн и авроральная обсерватория Соданкюля начали работать, соответственно, в 1926 и 1914 г. На рис. 5.1 представлена временная эволюция возмущений геомагнитного поля, обусловленная усилением  $W_{EJ}$  вследствие воздействия на магнитосферу ВСП СВ. Показаны разности ( $\Delta$ ) между наиболее возмущенным уровнем и наиболее спокойным уровнем для геомагнитной  $Z$  компоненты в обс. Годхавн с 1926 г. На графике параметра  $\Delta Z$  GDH выделяются 1952 и 2003 гг. Также достаточно большую амплитуду имеют 1974, 1983 и 1994 гг. Величина  $\Delta Z$  соотнесена с ходом числа солнечных пятен (ЧСП) в 11-летнем солнечном цикле. Можно видеть, что  $\Delta Z$  имеет пики на фазе спада цикла в годы, когда скорость СВ максимальна. На рис. 5.2 представлен вековой ход среднегодовых значений параметра горизонтальной геомагнитной компоненты  $\Delta H$  на авроральной обсерватории Соданкюля в ночном секторе 23–02 MLT. Можно также видеть два максимума, в 1953 и 2003 гг. На рис. 5.3 представлено соотношение между среднегодовыми значениями  $\Delta H$  SOD для сектора 23–02 MLT и  $\Delta Z$  GDH (значения, усредненные по всем MLT). Коэффициент корреляции в обоих случаях составляет 0,78, а линейная регрессия описывается соответственно уравнениями  $V_{св}=0,95\Delta H-258,8$  и  $V_{св}=3,22\Delta Z+367,81$ .

Таким образом, после экстремальных ВСП СВ в 1952 г. на спаде 18-го солнечного цикла последовал исключительно высокий солнечный цикл 19, который был вершиной современного 100-летнего солнечного «гранд-максимума». Полученные результаты впервые дают экспериментальное подтверждение того, что исключительно мощному тороидальному полю 19-го солнечного цикла предшествовало не менее мощное полоидальное поле 18-го цикла.

### **5.2. Термодинамические эффекты в авроральной мезосфере-нижней термосфере во время внезапных стратосферных потеплений**

В период уникально низкой солнечной активности в минимуме между 23 и 24 циклами в авроральной мезосфере–нижней термосфере с помощью метеорного радара выявлены и проанализированы специфические термические и динамические возмущения,

связанные с внезапными стратосферными потеплениями (Sudden stratospheric warming, SSW). Показано, что экстремально низкая солнечная активность является необходимым условием, определяющим возможность детектирования эффектов внезапных стратосферных потеплений на высотах мезосферы.

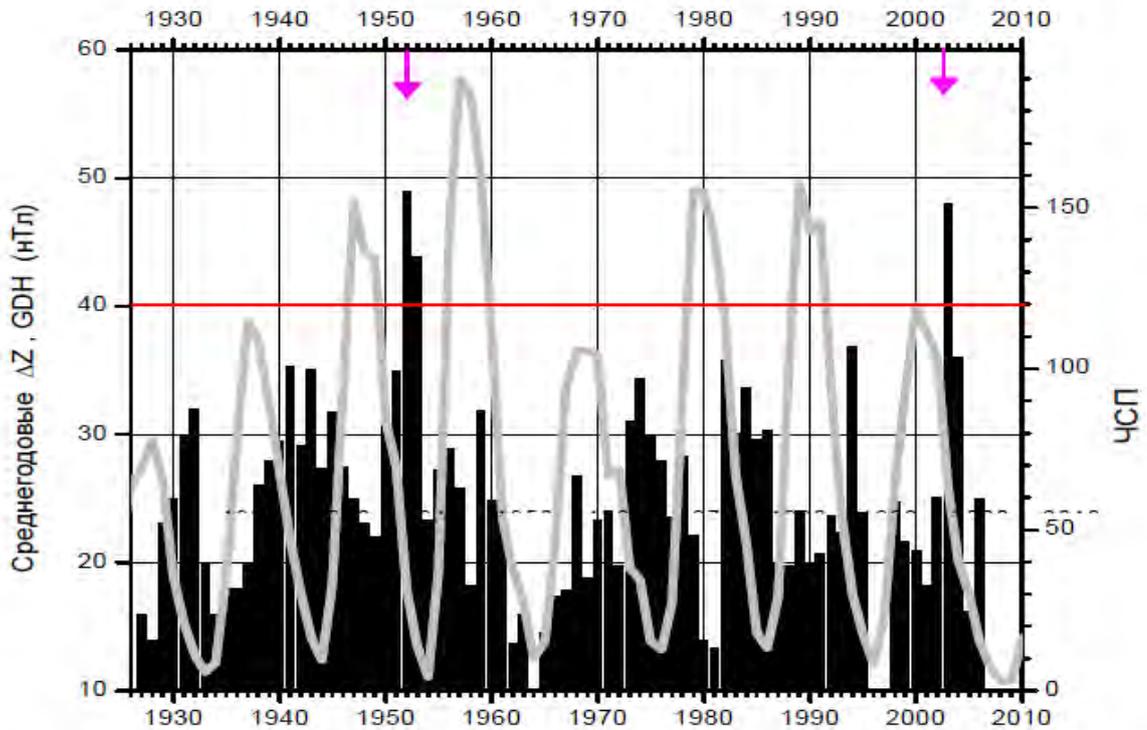


Рисунок 5.1 – Разность между наиболее возмущенным уровнем и наиболее спокойным уровнем вертикальной геомагнитной компоненты ( $\Delta Z$ ) для каждого года, начиная с 1926 г., для obs. Годхавн (черные вертикальные линии). Красной горизонтальной линией обозначен уровень 40 нТл. Серой линией показан ход 11-летних солнечных циклов

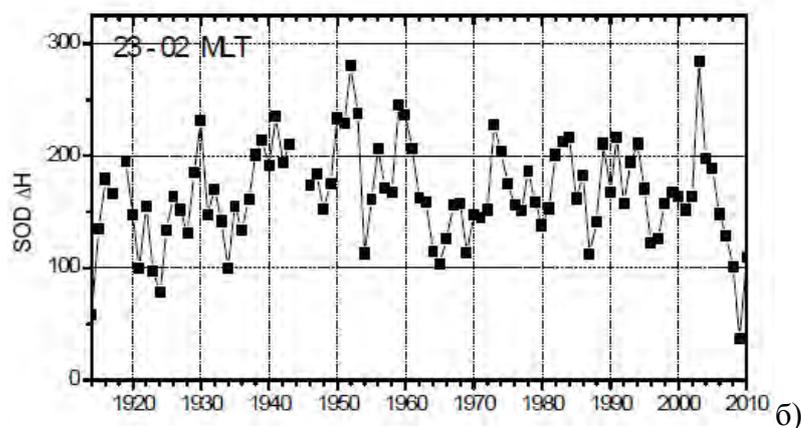
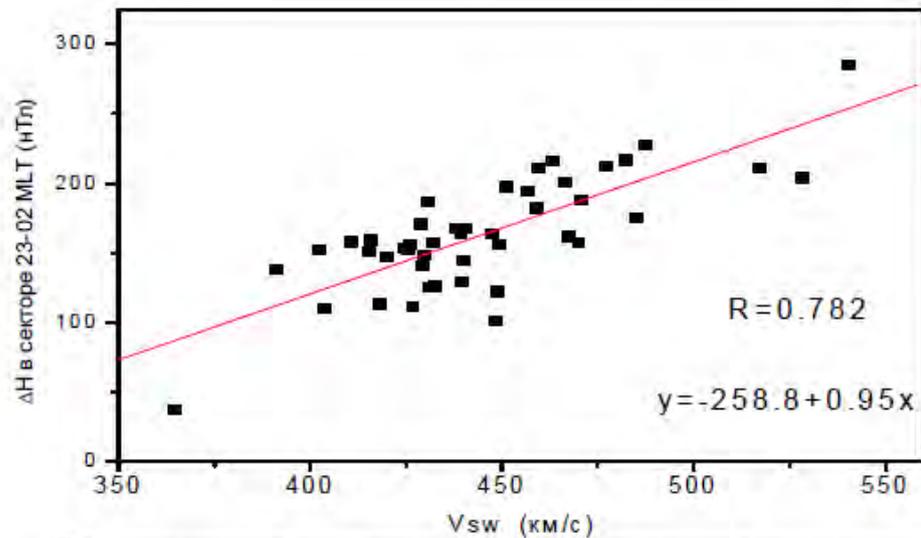
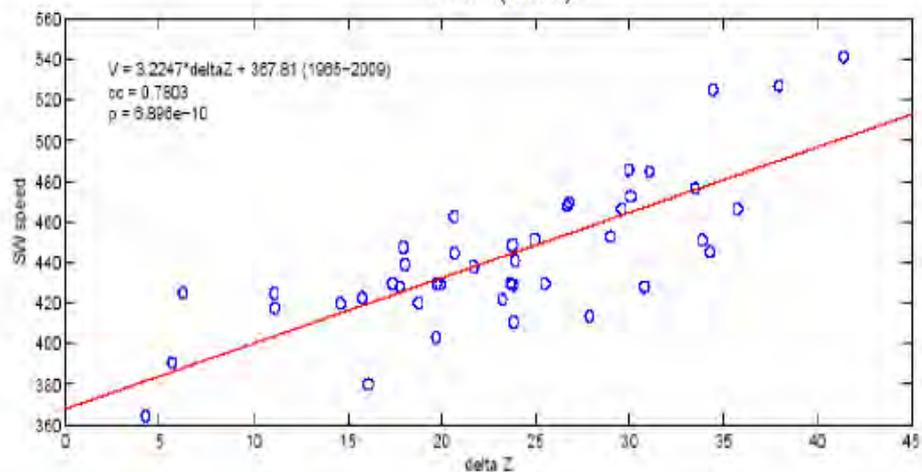


Рисунок 5.2 – Среднегодовые значения  $\Delta H$  в секторе 23-02 MLT

а)

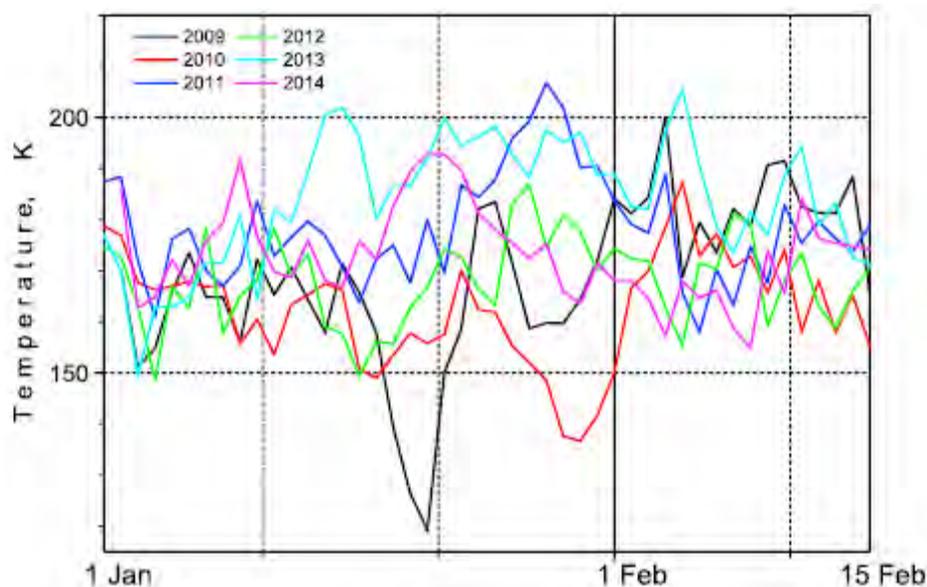


б)

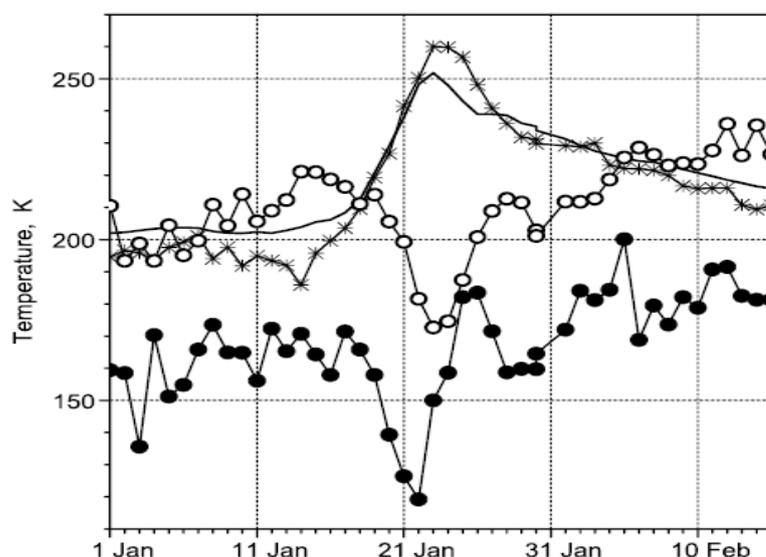


**Рисунок 5.3 – (а) Реконструкция среднегодовых значений скорости СВ (линия) и спутниковые измерения (точки); (б) Соотношение между среднегодовыми значениями  $\Delta Z$  GDH и измеренной скоростью СВ за 1965–2010 гг.**

Температура и две компоненты ветра на высотах 82–98 км измерялись с помощью метеорного радара, установленного в геофизической обсерватории Соданкюля. Было проанализировано 6 лет измерений, во время которых было не менее 6 событий SSW. Однако, только в событии января 2009 г. на мезосферных высотах можно было наблюдать эффект понижения температуры и ветровой сдвиг на высоте мезопаузы. На рис. 5.4 показан ход температуры на 90 км для зим 2009–2014 гг. Падение температуры 19 января 2009 г. связано с большим SSW. На рис. 5.5 представлены температуры в стратосфере и мезосфере во время SSW. Можно видеть, что пик адиабатического охлаждения в мезосфере наступает на день раньше, чем пик потепления в стратосфере. Обнаруженный эффект указывает на энергообмен между средней и верхней атмосферой, вероятно, посредством гравитационных волн.



**Рисунок 5.4 – Среднесуточные мезосферные температуры на ~90 км по данным метеорологического радара в Соданкюле (1/01–15/02) в 2009–2014 гг.**



**Рисунок 5.5 – Среднесуточные мезосферные температуры на ~90 км по данным метеорологического радара (линия с черными точками), спутника Aura (линия с кружками) и реанализу MERRA (линия со звездочками) с 1/01 по 15/02 2009**

**По теме проекта опубликованы 2 статьи:**

1. Mursula K., **Lukianova R.**, and Holappa L. Occurrence of the high-speed solar wind streams over the Grand Modern Maximum // *The Astrophys. Journal*. 801:30. DOI:10.1088/0004-637X/801/1/30. 2015 (IF 2014 – 5,993).
2. **Lukianova R.**, Kozlovsky A., Shalimov S., Ulich T. and Lester M. Thermal and dynamical perturbations in the winter polar mesosphere-lower thermosphere region associated with sudden stratospheric warmings under conditions of low solar activity // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 120. DOI: 10.1002/2015JA021269. 2015 (IF 2014 – 3,52).

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

**Номер гос. регистрации № 115082070006 (0145-2015-0004)  
Руководитель проекта директор, академик А. Д. Гвишиани.  
Ответственный исполнитель зав. сектором А. И. Рыбкина**

Целью проекта по программе 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» является сравнительное аналитическое исследование развития методов добычи углеводородов (далее – УВ) в России и других странах мира за период 1900 по 2000 гг. Собранная и обработанная информация по развитию методов добычи и разведки месторождений нефти и газа за 20 век позволит провести в полном объеме сравнительное аналитическое исследование и проанализировать развитие методов добычи УВ в странах мира, включая Россию, оценить скорость развития науки и техники, а также сравнить развитие методов добычи во времени, их изменение в России и странах мира. Наглядность и визуальную репрезентативность данной работе обеспечит специальное программное обеспечение, разработанное для визуализации базы данных (далее – БД) с использованием новейших средств сферической визуализации. Актуальность данной работы обусловлена следующими показателями: отсутствие аналогов в России и других странах мира; возможность фильтрации и сортировки данных посредством встроенных методов портала; отсутствие необходимости в специализированном ПО для работы с предоставленной информацией; широкий спектр возможного применения результатов.

### **6.1. Разработка базы данных**

Важнейшей задачей, определяющей создание и наполнение базы данных по месторождениям углеводородов, является аналитический обзор и анализ литературных источников. Для эффективной обработки данных и дальнейшего аналитического обзора необходимо опираться на верифицированную базу данных, составленную на основании проверенных источников информации. Среди них многочисленные справочники, монографии, статьи ведущих российских и зарубежных авторов в реферируемых журналах, тезисы российских и международных конференций, отчеты Министерства природных ресурсов, фондовые материалы, отчеты о балансе запасов полезных ископаемых РФ, а также материалы открытых интернет-источников (сайты нефтедобывающих компаний, академические профильные словари и пр.).

Проведенный аналитический обзор и накопление соответствующей информации позволили составить полный список крупных и суперкрупных месторождений УВ и

послужили основой для составления атрибутивной таблицы базы данных и ее дальнейшего наполнения. При составлении атрибутивной таблицы было учтено то, что данные по всем месторождениям можно разделить на два типа: статистические и динамические. К статистическим элементам метаданных относятся характеристики месторождений, не меняющиеся во времени. Динамические – данные изменяющиеся во времени.

### **6.1.1. Статические элементы метаданных**

К статическим данным относятся:

1. название месторождения;
2. точные координаты;
3. местоположение;
4. тип залежей;
5. даты открытия и ввода месторождения в эксплуатацию;
6. информация о коллекторе;
7. плотность нефти;
8. разрабатывающее предприятие;
9. количество запасов.

Ниже приводится обоснование выбора данных параметров и краткая характеристика каждого из них.

Название месторождений УВ в атрибутивной таблице приводится на двух языках – русском и английском. Это объясняется различной интерпретацией названий месторождений тех или иных стран мира на разных языках.

Отображение координат месторождений в атрибутивной таблице служит, главным образом, для дальнейшей визуализации базы данных с использованием специального программного обеспечения и передовых средств сферической визуализации. Однако, без использования специальных программ, сами по себе координаты недостаточно информативны. Поэтому в следующей графе таблицы приводится физико-географическое положение месторождения, которое дает представление общей картины приуроченности крупных и суперкрупных месторождений УВ к определенным странам.

Поле «классификация залежей» содержит в себе данные по фазовому соотношению и составу основных углеводородных соединений в месторождениях нефти и газа. В данной работе используется классификация, утвержденная Министерством природных ресурсов и экологии РФ. Согласно данной классификации выделяется 6 типов месторождений:

- *нефтяные*, содержащие только нефть, насыщенную в различной степени газом;
- *газонефтяные*, в которых основная часть залежи нефтяная, а газовая шапка не превышает по объему условного топлива нефтяную часть залежи;

- *нефтегазовые*, к которым относятся газовые залежи с нефтяной оторочкой, в которой нефтяная часть составляет по объему условного топлива менее 50%;
- *газовые*, содержащие только газ;
- *газоконденсатные*, содержащие газ с конденсатом;
- *нефтегазоконденсатные*, содержащие нефть, газ и конденсат.

Следующие две графы атрибутивной таблицы включают в себя дату открытия месторождения и дату начала добычи углеводородов в промышленных масштабах.

Следующий немаловажный пункт атрибутивной таблицы – информация о коллекторе, т.е. о породах, вмещающих жидкие и газообразные УВ. К этому относятся его литологические особенности, иными словами, вещественный состав и возраст пород, который приводится согласно актуальной на данный момент Международной стратиграфической (геохронологической) шкале (ВСЕГЕИ).

Плотность нефти – одна из важнейших ее характеристик, отражающих ее качество с точки зрения промышленного сбыта и использования. Плотность нефти напрямую зависит от содержания в ней парафиновых углеводородов и смол.

Следующий пункт атрибутивной таблицы – компании-разработчики месторождений. Как правило, это ведущие мировые компании и их дочерние предприятия, являющиеся передовиками в области добычи и переработки УВ.

Запасы УВ – завершающая графа в атрибутивной таблице постоянных во времени данных. В данном проекте, так же как и в нефтегазовой промышленности России, в настоящее время применяется «Классификация запасов и прогнозных ресурсов нефти и горючих газов», утвержденная Министерством природных ресурсов и экологии РФ.

### **6.1.2. Динамические элементы метаданных**

К следующему разделу атрибутивной таблицы, относятся данные, которые периодически претерпевают изменения во времени. Среди них:

1. методы добычи;
2. технология добычи;
3. технологические особенности;
4. дебит скважин.

Все указанные параметры фиксируются в таблице с интервалом в 1 год.

Исторически *методы* и *технологии* добычи УВ (два следующих крупных содержательных блока атрибутивной таблицы), в частности нефти, в зависимости от давлений внутри пласта и способов его поддержания, делятся на три типа. Подобное деление методов принято практически однозначно в нефтяной промышленности во всем мире, и, безусловно, фигурирует в классических учебниках советских и российских ученых-классиков. Далее мы остановимся на каждом из методов.

Первичный метод. Нефть поступает из пласта под действием естественных сил, поддерживающих высокое давление внутри пласта.

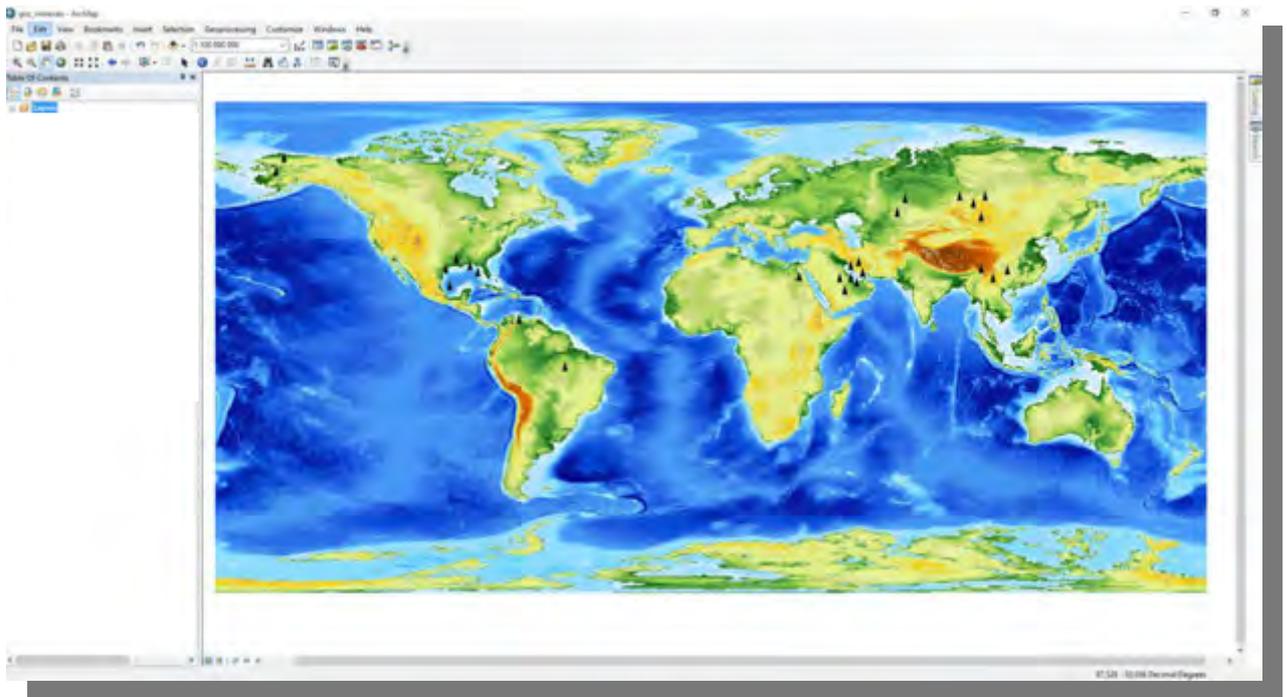
Вторичный метод. После истощения естественного ресурса поддержки давления, когда оно уже недостаточно для подъема нефти, начинается применение вторичных методов. Технология добычи данного метода заключается в подведении в пласт внешней энергии в виде закачиваемой жидкости (например, пресной воды), природного или попутного газа.

Третичный метод. Метод повышения нефтеотдачи, осуществляемый путем не только искусственного поддержания энергии пласта, но и путем искусственного изменения физико-химических свойств нефти. Разнообразие технологических особенностей данного метода очень велико и не имеет определенной классификации. По типу способов воздействия на нефть и на сам пласт, а также по типу рабочих агентов можно привести следующую условную классификацию: тепловые методы – закачка горячей воды, пара; газовые методы – закачка двуокиси углерода, углеводородных газов для разжижения нефти; физические методы – вибровоздействие на пласт, плазменно-импульсное воздействие; химические методы – закачка химических реагентов; гидродинамические методы – внутриконтурное и законтурное заводнение, гидроразрыв пласта; комбинированные методы; физико-химические методы и др.

Технологические особенности добычи включают в себя комплекс работ с использованием специального оборудования при добыче. Как правило, технологические особенности очень индивидуальны для каждого рассматриваемого месторождения и основаны на многих факторах, среди которых: свойства углеводородов, свойства коллекторов, особенности залежей и др.

Следующий параметр, динамично изменяющийся во времени по мере разработки месторождения – это промышленный приток, или величина дебита нефти и/или газа из скважины. Единицы измерения в данном случае – млн тонн и млрд м<sup>3</sup> для нефти и газа соответственно.

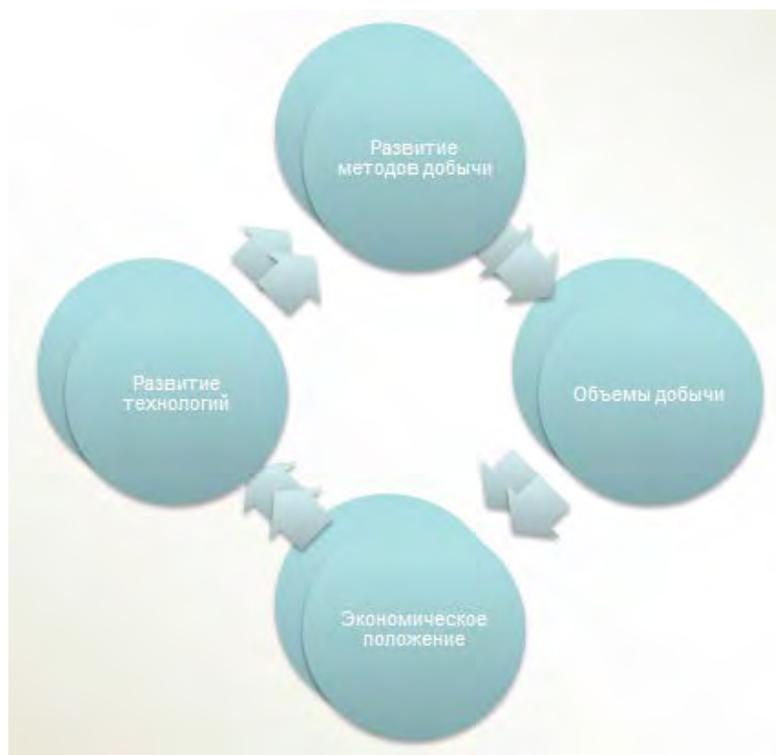
Все собранные данные по месторождениям представляют собой поля атрибутивных таблиц для базы данных, реализуемой в среде ESRI ArcGIS 10.3. Таким образом, в результате анализа информации о местоположении каждого из месторождений, мы получим наглядную визуализацию базы данных в виде геопространственных объектов. В следующем этапе программы визуально все месторождения будут представлять собой единую карту с инструментами работы и фильтрации данных по разным параметрам. Модель представления проекта в ГИС среде приведена ниже (рис. 6.1). Для примера использовалась картографическая подложка GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) – это глобальная модель рельефа земной поверхности, включающая данные о рельефе суши и батиметрии морского дна.



**Рисунок 6.1 – Модель представления месторождений в ArcGIS. Общий вид**

## **6.2. Аналитический обзор**

Обширные геологические запасы стран, занимающих на протяжении нескольких последних десятков лет прошлого века лидирующие позиции по поставке УВ, позволили не только значительно улучшить экономическое положение внутри каждой страны и утвердиться на мировой арене, но и послужили значительным стимулом к усовершенствованию и развитию новых методов добычи и разведки нефтегазовых месторождений. Развитие технологий добычи полезных ископаемых приводит к увеличению объемов среднегодового дебета, что оказывает влияние на экономическое положение страны в целом (рис. 6.2). Таким образом, динамические показатели разрабатываемой БД в значительной степени характеризуют процесс развития науки и техники в мире и могут служить основой для проведения аналитического обзора по теме программы. Стоит отметить, что оценка геологических запасов углеводородов носит лишь приблизительный характер и зависит от множества причин: геологической изученности территории, масштабов поисково-разведочных работ, а также нередко от общеэкономических, политических и даже социальных факторов, вынуждающих отдельные фирмы, и даже страны, публиковать намеренно завышенные или, напротив, заниженные оценки имеющихся у них запасов природных ископаемых. Поэтому нередко данные о количестве запасов в изданиях разных стран очень разнятся.



**Рисунок 6.2 – Взаимосвязь экономики страны и развития нефтегазовой промышленности внутри нее**

Проведенные исследования показали, что в целом присутствует тенденция к увеличению показателей добычи углеводородов в странах-лидерах по добыче углеводородов. Наиболее важные факторы, влияющие на это – освоение уже действующих месторождений новыми методами разведки и разработки, что позволяет выявлять новые перспективные участки и повышать коэффициент извлекаемости, тем самым делая добычу экономически более выгодной.

Около 2/3 мировых геологических запасов нефти сосредоточены в странах Ближнего и Среднего Востока (Саудовская Аравия, Ирак, Иран и пр.). Второе место в мире по запасам принадлежит Южной и Северной Америкам (Венесуэла, Мексика, США) – около 15,2%. На третьей позиции находится Африка, где сегодня сосредоточено около 6,8% всех мировых геологических запасов нефти (Ливия, Нигерия, Алжир). И лишь на четвертой строке списка находятся страны бывшего СССР, и прежде всего Россия (4,7%), занимающая первое место по добыче в мире по данным на 2012 г. (таблица 6.1).

В Саудовской Аравии (нынешний лидер по добыче нефти) объем добычи в рассматриваемые периоды (с 1970 по 1995 гг.) существенно колеблется, что связано не только с освоением новых перспективных территорий, но (главным образом) с регулированием ОПЕК цен на нефть путем ограничения объема производства нефти в стране. Что касается России (и бывшего СССР), то пик добычи пришелся на 1980 г. Позже, к середине 1990-х, уровень добычи значительно снизился (связь с развалом СССР и кризисом). Однако к началу 2000-х нефтепроизводство стало существенно расти и развиваться, что позволило РФ занять лидирующее положение по добыче на данный момент.

**Таблица 6.1 – Объем добычи нефти в странах мира в 2012 году (млн барр.)**

<b>Место</b>	<b>Изменение места за 2012 год</b>	<b>Страна</b>	<b>Добыча нефти в 2012 году, млн барр.</b>	<b>Изменение в сравнении с 2011 г.</b>	<b>Доля в мировой добыче</b>
1	0	Россия	3795,4	1,3%	12,7%
2	+1	США	3656,3	10,9%	12,2%
3	-1	Саудовская Аравия	3572,2	5,3%	11,9%
4	0	Китай	1540,9	2,7%	5,1%
5	+1	Канада	1368,8	5,3%	4,6%
6	+2	Ирак	1090,3	12,1%	3,6%
7	-2	Иран	1087,0	-17,9%	3,6%

Добыча нефти в США (крупнейшем ее потребителе) достигла своего максимума в период 1970–1980 гг. и с тех пор снижалась. К 2002 г. это снижение составило около 20 %. Сейчас США в тройке лидеров – 519 млн тонн нефти добыто за 2014 г.

### **6.3. Заключение**

Разработанная БД является уникальным научным продуктом, не имеющим аналогов, который позволяет производить сравнительный аналитический обзор развития науки и техники в мире за 20 век. Обширные геологические запасы стран, занимающих на протяжении нескольких последних десятилетий прошлого века лидирующие позиции по поставке УВ, позволили не только значительно улучшить экономическое положение внутри каждой страны и утвердиться на мировой арене, но и послужили значительным стимулом к усовершенствованию и развитию новых методов добычи и разведки нефтегазовых месторождений.

По результатам работы была опубликована статья в иностранном журнале, индексируемом в международной системе цитирования Web of Science и Scopus.

## 7. Новые математические методы моделирования геофизических процессов

Номер гос. регистрации № 115082070003 (0145-2015-0007)

Руководитель проекта директор, академик А. Д. Гвишиани.

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

Проект программы Президиума РАН П.4П «Фундаментальные проблемы математического моделирования» направлен на разработку и применение новых математических методов для исследования динамики геофизических явлений. Речь идет о динамических уравнениях, описывающих геофизические процессы, в которые входят случайные параметры. Предложены методы введения случайных факторов в уравнения распространения электромагнитных волн в случайных средах. Исследованы методы введения случайных факторов в эволюционные уравнения. Подробно рассмотрен случай, когда система может находиться только в двух состояниях с возможностью случайного перехода между ними. Обоснованы новые методы анализа геодинамических процессов на основе использования эволюционных уравнений и теории графов, сформулированных в терминах вероятности наблюдать заданный процесс, что позволит оценивать влияние случайных факторов на протекание любых геофизических процессов. Анализ случайных временных рядов основан на принципах дискретного математического анализа (ДМА) и представляет важный шаг в анализе геофизических данных. Для исследования вариаций геомагнитного поля предложен целый набор моделей фильтрации сигналов.

Основная идея проекта состоит в том, что за рядами геофизических данных стоит некоторый вероятностный процесс, т.е. каждая последовательность данных реализуется с некоторой вероятностью. Этого, однако, недостаточно, чтобы продвинуться вперед. Нужно ввести процедуру усреднения по всем реализациям. Сделать это можно очень поразному. Например, можно считать, что параметры соответствующих процессов не зависят от времени и распределены по закону Гаусса. Тогда окончательное решение уравнения можно усреднить по этой вероятности и найти затем любые интересующие нас средние. Можно поступить иначе: считать, что известна *вероятность* реализации заданной функции  $w[N(t)]$ . Например, мы можем считать, что вероятность застать заданную функцию опять задана законом Гаусса, но уже в функциональном пространстве. Теперь для вычисления средних придется иметь дело с функциональными интегралами. Еще один способ – это рассматривать дихотомные процессы (процессы, в которых реализуются всего два состояния). Скорости переключения между двумя состояниями являются параметрами уравнений. Эти параметры должны подбираться из сравнения теоретических заключений с экспериментальными данными. Естественно, можно не ограничиваться дихотомными процессами, а рассматривать стохастические системы со многими состояниями или даже с распределенными состояниями.

При таком подходе возникает вопрос о доминанте. Если есть доминантный процесс (или несколько доминантных процессов), то необходимо разработать методы их выделения. В исключительной важности решения этой задачи не приходится сомневаться.

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 высоковозбужденных нейтральных молекулярных комплексов, являющихся эффективными излучателями электромагнитных волн в радиодиапазоне. Эти процессы приводят к магнитным бурям.

Исследование всех вышеупомянутых кинетических процессов составляет основную цель работ по проекту. Основу метода исследований составляют динамические уравнения, связывающие пространственно-временную зависимость векторного потенциала с индуцированными токами в ионосферной плазме. В отличие от существующих подходов предполагается использовать стохастические дифференциальные уравнения для описания распространения электромагнитных волн в случайной среде (в данном случае ионосферной плазме), в которой флуктуации токов и зарядов вызваны турбулентностью и кинетическими процессами, связанными с взаимодействием плазмы с солнечным излучением. Немаловажным фактором во всех этих процессах является присутствие в нижней ионосфере взвешенных наночастиц (плазмозолей), ускоряющих многие кинетические процессы и ведущих к появлению специфических коллективных мод в системе плазма–электромагнитное поле.

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.

Наша активность в течение отчетного года была направлена на исследование распространения электромагнитной волны в средах с дискретно меняющейся диэлектрической проницаемостью и средах с дисперсными рассеивателями. В обоих случаях требуется микроскопическое описание взаимодействия рассеивателя с электромагнитной волной, статистическое описание пространственной структуры случайных включений и способ усреднения фотонного пропагатора по всем реализациям пространственных конфигураций случайного фактора.

Можно ввести диэлектрическую проницаемость и задавать вероятность ее реализации. После этого можно усреднять по всем реализациям фотонный пропагатор (функцию Грина векторного волнового уравнения). Зависимость пропагатора от диэлектрической проницаемости в данной точке считается известной. Трудность возникает из-за того, что диэлектрическая проницаемость положительна (она становится комплексной, если среда поглощающая). Поэтому гауссовское распределение не может считаться хорошим кандидатом на роль такой вероятности. Однако, можно использовать вариант теории возмущений, в котором электромагнитная волна распространяется в среде с пространственно-постоянной диэлектрической проницаемостью, а неоднородность мала по абсолютной величине, и ее можно считать распределенной по гауссовскому закону.

Такой подход известен, но он неудобен из-за вклада состояний с отрицательной диэлектрической проницаемостью. И, конечно, он не работает, если рассеивающая компонента имеет резонансные слагаемые. Этот случай представляет особый интерес при рассмотрении распространения электромагнитных волн в условиях нижней ионосферы (80–100 км).

Другой выбор модельного распределения свойств – это логнормальное распределение. Такой подход еще не использовался, и нет ясности, насколько он перспективен. Можно надеяться, что в случае непоглощающих сред этот подход будет работать. Единственная трудность – это вычисление соответствующих функциональных интегралов.

Коэффициенты прохождения электромагнитной волны через случайную рассеивающую среду, содержащую частицы дисперсной фазы, выражаются через сечение рассеяния световой волны на заданный угол. Сформулированное нами уравнение имеет более общий смысл и описывает любые случайные среды с резкими границами раздела.

Флуктуационные явления в магнитосфере Земли характеризуются различными временами – от суток до долей секунды. В этом разделе рассматриваются короткопериодные флуктуации, вызванные наличием коллективных электромагнитных колебаний, связанных с распространением электромагнитных волн в верхних слоях атмосферы. Это могут быть флуктуации, связанные с турбулентностью и вызванными ею флуктуационными токами, рассеянием и переизлучением электромагнитного поля плазмозольными частицами, присутствие которых приводит к появлению специфических колебаний, связанных с перезарядкой плазмозольных частиц, а также с возможностью возбуждения плазменных резонансов в системе экстраэлектронов поверхностного слоя.

Дисперсный материал поставляется в верхние слои атмосферы за счет доставки пылевых частиц (микрометеориты) из космоса, либо в результате сгорания метеоритного материала при входе в достаточно плотные слои атмосферы. Пары нелетучих веществ, образующихся при сгорании, конденсируются и образуют аэрозольные частицы. Спектры электромагнитных флуктуаций зависят от распределения плазмозольных частиц в атмосфере. Хотя поток метеоритного вещества к земной поверхности известен, механизмы, отвечающие за образование частиц дисперсной фазы, еще недостаточно изучены. И это очень важный момент, т.к. скорость образования частиц, мощность их источника и скорость вывода частиц из верхних слоев атмосферы регулируют счетную концентрацию и дисперсный состав плазмозоля ионосферы.

Аэрозоли и облака являются основными факторами, влияющими на радиационный бюджет Земли и климат. При отсутствии облаков аэрозоли управляют экстинкцией радиации. В достаточно влажной атмосфере аэрозоли могут действовать как ядра конденсации и льдообразования и влиять, таким образом, на альбедо земной атмосферы и потребление солнечной энергии земной поверхностью. Химический состав аэрозолей и их химическая активность определяют кислотность и химический состав малых газовых примесей, что, в свою очередь, влияет на процессы образования и роста вторичных аэрозолей. Итак, аэрозоли играют важную роль в формировании погодных и

климатических условий, а также качества воздуха, они взаимодействуют со многими компонентами атмосферы и биосферы и являются, таким образом, одним из важнейших факторов, которые необходимо изучать для правильного понимания глобальных атмосферных изменений в атмосфере Земли.

Необычные свойства аэрозольных частиц связаны с их малым размером. Аэрозольные частицы, так же как и атомы, могут иметь дискретные энергетические уровни и служить ловушками для свободных носителей тока (т.н. квантовые точки). Это их свойство используется в электронике при создании микросхем. Сам процесс получения нанометровых объектов также может идти через аэрозольное состояние, т.е. сначала выращивают аэрозольные частицы нужного размера, а потом их осаждают на подложку. Технология этого процесса требует знаний законов зарождения и роста аэрозольных частиц. Аэрозольные частицы обладают аномальными электродинамическими свойствами. В оптическом диапазоне длин волн субмикронные аэрозоли являются эффективными рассеивателями видимого света. Кроме того, атмосферные субмикронные аэрозоли хорошо поглощают УФ излучение и даже могут приобретать заряд под действием видимого света. Далее, в проводящих аэрозольных частицах существуют собственные колебания поверхностного электрического заряда (поверхностные плазмоны). В очень мелких частицах положение соответствующих резонансов зависит от размера частицы, и таким образом его можно регулировать. В аэрозольных частицах возможна сверхпроводимость. В сверхпроводящих частицах также существуют дискретные коллективные состояния.

Общая цель исследований атмосферных аэрозолей – усовершенствовать понимание их роли в механизмах воздействия на атмосферу и предсказание глобальных изменений климатических условий на Земле. В контексте проблемы решаемой проектом необходимо знать детали процесса зарождения аэрозоля для корректной роли оценки влияния случайных факторов на геофизические процессы в атмосфере. Для достижения этих целей необходимы серьезные усилия в моделировании и экспериментальных исследованиях атмосферных аэрозольных процессов, а также методов, позволяющих исследовать влияние на них случайных факторов.

До сих пор все существующие модели оперировали (и продолжают оперировать) детерминистическими уравнениями, описывающими средние поля аэрозольных концентраций. Между тем атмосфера – принципиально стохастическая среда, где роль случайных факторов не может быть пренебрежимо малой. Цель проекта – исследовать влияние атмосферных флуктуаций на кинетику аэрозольных процессов.

Атмосфера – принципиально стохастическая система. Параметры, существенно влияющие на аэрозольное состояние атмосферы, такие как температура, интенсивность солнечной радиации (особенно в УФ диапазоне), концентрации малых газовых примесей, не могут быть заменены их средними значениями. К примеру, солнечная радиация зависит от облачности, которая меняется случайно как в пространстве, так и во времени. В то же время, скорости внутриаэрозольных фотохимических процессов связаны с УФ радиацией, интенсивность которой может быть полностью подавлена облаками.

Итак, вместо формулирования управляющих уравнений для средних, предпочтительнее вводить вероятность обнаружения заданного набора параметров в заданный момент времени. Следующий шаг – решение сформулированных уравнений.

До настоящего времени не предпринималось попыток стохастического моделирования атмосферы. Не существует даже грубых оценок влияния атмосферных флуктуаций на динамику аэрозольных процессов, хотя атмосферные аэрозоли должны быть наиболее чувствительны к флуктуациям атмосферных параметров. Например, даже незначительные изменения концентраций газов, из которых образуются аэрозольные частицы, могут менять скорости образования частиц на порядки. Эти идеи легли в основу формулировки принципов стохастического аэрозольного моделирования и вывода основных уравнений, управляющих вероятностями застать заданное аэрозольное состояние.

Не менее важно рассмотрение процессов взаимодействия отдельных частиц с атмосферой, таких как испарение и рост частиц, захват частицами малых газовых примесей, обмен энергией с атмосферой. Эти исследования включены в проект.

Аэрозольное состояние атмосферы характеризуется полем концентрации аэрозольных частиц. В противоположность общепринятому подходу, который предполагает введение средней концентрации и эволюционного уравнения для этого поля, мы вводим вероятность застать данное аэрозольное состояние в заданный момент времени и формулируем уравнение для этой вероятности. Ожидается, что это уравнение будет содержать вариационные производные, а его структура будет напоминать уравнение Фоккера-Планка.

Другой подход основан на уравнении Ланжевена. Стохастический фактор вводится в классические кинетические уравнения. Например, можно рассмотреть формальные уравнения химической кинетики со случайной константой скорости реакции или более сложные аэрозольные кинетические процессы.

В настоящее время становится все более очевидным, что процессы образования атмосферных аэрозолей могут дать существенный вклад в производство облачных ядер конденсации и тем самым влиять на климатические и погодные условия на нашей планете. Общепринятое мнение связывает процессы образования аэрозолей с добавочным производством низколетучих соединений, которые затем в результате нуклеации производят высококонцентрированный и высокодисперсный аэрозоль, который затем растет за счет конденсации низколетучих соединений и воды. Эти низколетучие соединения (состав их до сих пор не известен) также взаимодействуют с уже существующими частицами (обычно значительно более крупными). Появление низколетучих конденсирующихся и нуклеирующих соединений связано с определенным сочетанием внешних атмосферных условий (уровень солнечной активности, выделение органических газов растительным покровом, наличие эффективных стоков низколетучих газов). Все эти внешние факторы флуктуируют, что очень сильно влияет на скорость производства вторичных аэрозольных частиц. Несмотря на усилия больших групп

исследователей, ни участники химических аэрозольных циклов, ни скорости соответствующих аэрозольных процессов толком не известны.

Несмотря на низкий уровень знаний о механизмах образования аэрозолей, попытки моделирования соответствующих процессов предпринимаются на все более высоком техническом (компьютерном) уровне. Эти попытки дают результаты, качественно согласующиеся с наблюдениями. Сами модели используют весьма разнообразные наборы внешних условий. Согласие между результатами расчетов по столь разнообразным моделям указывает на относительную нечувствительность результата к изменениям внешних условий. При этом, однако, приходится очень тщательно подбирать параметры нуклеационного процесса. Последний вводится полуэмпирически, т.к. теории атмосферной нуклеации нет.

Существенно еще раз подчеркнуть, что все существующие модели используют детерминистический подход. Очевидно, что наши методы могут быть легко распространены на случай линейных систем. Интересно и важно отметить, что во многих практически важных случаях эволюционирующие аэрозоли в атмосфере могут быть рассмотрены как линейные системы со случайно меняющимися параметрами.

Аэрозолеобразование связано со многими важными процессами в атмосфере: газофазные и жидкостные химические преобразования, нуклеация, конденсация и испарение, коагуляция, а также массопередача через поверхность частиц. Для адекватного описания изменчивости атмосферных аэрозолей необходимо иметь четко сформулированную модель, описывающую все эти процессы и взаимодействие между ними.

Атмосферные аэрозоли и малые газовые примеси в значительной степени определяют глобальные характеристики земной атмосферы и ее экологию. Так происходит потому, что эти компоненты связаны с химическими изменениями, происходящими в нашей атмосфере под влиянием куда более концентрированных газовых реагентов – результатов антропогенной активности, а также с передачей энергии в атмосфере. Речь идет, в основном, об аэрозолях, активно участвующих в процессах очистки атмосферы от газовых загрязнений и в циклах химических реакций, определяющих современный состав атмосферы на отдельных территориальных единицах. Малые газовые примеси выступают только как элементы химических и фотохимических циклов, ведущих к зарождению аэрозольных частиц. Аэрозольные частицы способны выступать как облачные ядра конденсации и играть определяющую роль в процессах облакообразования и, тем самым, определять погоду и климат.

Рассмотрение стохастических нелинейных систем сопряжено с громадными трудностями. Мы исследовали процесс парного укрупнения (нелинейность второго порядка), который играет решающую роль как в атмосферных процессах (формирование турбулентных потоков, образование торнадо и др.), так и в ряде процессов в земной коре и на поверхности (образование трещин, опустынивание, заболачивание). Рассматривается система объектов, каждому из которых приписывается масса, и в ходе эволюции под действием случайных факторов происходит парное слияние объектов с сохранением их

полной массы. Этот процесс играет решающую роль не только в образовании плазмозольных частиц, но и в огромном количестве природных и социальных процессов. Нами сформулировано точное решение такой задачи для произвольного начального спектра объектов и дан его скэйлинг-анализ вблизи критической точки (момента времени образования гигантского кластера). Именно это явление и изучается в проекте. Спонтанное образование суперкластера – это фазовый переход второго рода, роль параметра порядка в котором играет его масса, строго равная нулю в докритической области. Оказывается, вблизи критической области масса и другие моменты распределения кластеров по размеру ведут себя как степенные функции разности между текущим и критическим временем, причем соответствующая зависимость разная до и после критического момента. Соответствующие показатели степенных зависимостей носят название критических. В довольно общих случаях эти показатели универсальны, и их значения определяются общими законами сохранения или связями соответствующих параметров, следующих из динамики процесса. Так, например, распределение по массам имеет показатель  $5/2$ . Такое распределение вытекает из закона сохранения потока массы. Однако иногда происходит нарушение этих законов. Это нарушение исследуется в проекте. Оказывается, что вышеупомянутый закон применим к случаю экспоненциально убывающих начальных условий. Если эти условия степенные, то показатели степени начинают зависеть от устройства начальных условий. При этом процесс образования суперкластеров может идти по-разному в зависимости от величины второго момента начальной функции распределения. Если второй момент существует, то суперкластер образуется через конечный промежуток времени, величина которого обратно пропорциональна второму моменту. Если начальное распределение имеет пологий степенной хвост, то гигантский суперкластер образуется с самого начала процесса коалесценции.

В конечном итоге найдено явное решение проблемы объединения больших кластеров при произвольных начальных условиях. Используя эти решения, проанализирован эффект влияния начальных распределений кластеров, имеющих степенные хвосты при больших размерах кластеров.

В последнее время наиболее важные результаты в созданном в ГЦ РАН методе обработки данных под названием ДМА связаны с новым понятием регрессионной производной для функций, определенных на конечных подмножествах евклидова пространства. В рамках настоящего проекта на данном этапе приводится теоретическое обоснование этой конструкции, а именно доказывается утверждение о том, что для непрерывно дифференцируемой в классическом смысле функции инфинитезимально дискретная линейная регрессия совпадает с ее касательной.

Также в рамках проекта проведен обзор существующих методов фильтрации, оценивания параметров и спектрально-временного анализа наблюдений геомагнитного поля. Методы фильтрации наблюдений геомагнитного поля, с определённой степенью условности, можно подразделить на стандартные и нестандартные.

Предполагается, что стандартные методы фильтрации наблюдений геомагнитного поля с минутной и секундной дискретизацией реализуются обычными (традиционными)

цифровыми фильтрами (ЦФ). Существуют четыре возможных варианта методов фильтрации наблюдений геомагнитного поля на основе ЦФ:

- Методы фильтрации для обеспечения удаления высокочастотных шумовых помеховых составляющих в наблюдениях геомагнитного поля;
- Методы фильтрации для обеспечения удаления низкочастотных неинформативных составляющих в наблюдениях геомагнитного поля, в том числе и постоянных составляющих;
- Методы фильтрации для обеспечения выделения информативных составляющих геомагнитного поля в заданной полосе частот;
- Методы фильтрации для обеспечения удаления неинформативных составляющих (возможно, помеховых составляющих) геомагнитного поля в заданной полосе частот.

К нестандартным методам фильтрации наблюдений геомагнитного поля относятся методы фильтрации, основанные на регрессионных моделях, на вейвлет-функциях и авторегрессионных моделях.

## **Результаты**

Еще раз подчеркнем, что модели, претендующие на описание геофизических (и многих других) процессов, обязательно должны учитывать вероятностную природу самих этих процессов. Наблюдения и их обработка на уровне «среднеквадратичных корреляционных функций» не дают возможности ответить на вопрос, какого рода процесс стоит за тем или иным наблюдением. Более того, многие исследователи ошибочно считают, что усреднение большого числа данных увеличивает точность измерения. На самом деле увеличивается только точность измерения самого среднего. Естественный разброс (зависящий от вероятностной природы процесса) никуда не девается. Мы предложили описывать геофизические процессы с помощью вероятностных моделей, т.е. предполагая, что на коротких промежутках времени процесс детерминирован, мы допускаем возможность скачков между состояниями и введение скоростей переходов между состояниями. Определенно можно заключить, что в этом направлении предстоит большая работа. Однако, ожидаемый результат определенно заслуживает затраченных усилий.

Разработаны новые математические методы исследования динамики изменения электромагнитного состояния атмосферы (от тропосферы до ионосферы). Основная идея – это применение современных подходов, заимствованных из теории многих тел и теории поля.

Выявлено влияние аэрозоля на прохождение электромагнитных волн в верхней атмосфере. Исследована возможность возникновения новых электромагнитных мод в запыленных газовых средах. В частности, построена теория взаимодействия заряженной частицы атмосферного аэрозоля с электромагнитным полем. Найдены собственные

частоты колебаний электронного облака вокруг частицы. Показано, что рассеяние волн на этих частотах усиливается плазменными резонансами.

Построены и исследованы модели возникновения атмосферных частиц. Показано, что при соответствующем выборе параметров источников низколетучих атмосферных компонентов такие модели способны правильно воспроизводить концентрации и эволюцию распределения по размерам этих частиц. Сами модели допускают рандомизацию, т.е. введение фактора случайности. Результаты опубликованы в статье.

Разработаны методы анализа динамических процессов в глубоко неравновесных системах на основе использования эволюционных уравнений, сформулированных в терминах вероятности наблюдать заданный процесс. Этот новый подход позволяет оценивать влияние случайных факторов на протекание любых геофизических процессов. В частности, рассмотрена эволюция дисперсной системы, дисперсные включения которой способны к слиянию. Исследована асимптотическая стадия процесса. Впервые установлены параметры скэйлинговых режимов в системах с распределенными начальными условиями. Анализ основан на впервые предложенном выражении для спектра масс, которое само по себе представляет существенный вклад в теорию эволюции глубоко неравновесных систем. Результаты опубликованы в статье Лушников и др. (2015).

Разработан новый метод анализа случайных временных рядов с использованием идей дискретного математического анализа. Создана численная схема для анализа нерегулярных множеств моментов наступления событий.

### **Опубликованные в 2015 году работы, выполненные в интересах проекта**

1. F. Leyvraz and **A. A. Lushnikov**, Scaling anomalies in the sol-gel transition. // J. Phys. A 48 205002 (22 pp.) (2015).
2. **A. A. Lushnikov**, V. A. Zagaynov, and **Yu. S. Lyubovtseva**, Mechanisms of the formation of atmospheric aerosols in the Earth atmosphere // Russian Journal of Physical Chemistry 9, № 5. P. 796–806 (2015).
3. **A. A. Lushnikov**, Exactly solvable model of a coalescing random graph // Phys. Rev. E 88, 05212 (8 pp.) (2015).
4. **A. A. Lushnikov**, Source-enhanced coalescence of trees in a random forest // Phys. Rev. E 91, 022119 (8 pp.) (2015).
5. **А. А. Лушников**, В. А. Загайнов и **Ю. С. Любовева**, Механизмы образования наноаэрозолей в тропосфере // Химическая физика. 34. № 10. С. 51–62 (2015).

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

Номер гос. регистрации № 115082070002 (0145-2015-0009)  
Руководитель проекта директор, академик А. Д. Гвишиани.  
Ответственный исполнитель к.ф.-м.н. Р. И. Краснопёров

Настоящее исследование, выполненное в рамках Программы Президиума РАН № 5 «Месторождения стратегического сырья в России: инновационные подходы к их прогнозированию, оценке и добыче», нацелено на разработку инструментария для сбора, анализа и редактирования цифровой геопространственной информации о минерально-сырьевых ресурсах России. Данный инструментарий позволяет использовать связанную информацию о геолого-геофизических параметрах с целью получения новых фундаментальных научных обобщений, оценки масштабов распределения и прогнозирования минерально-сырьевых запасов. Для решения этой задачи ведется создание современной аналитической ГИС, предназначенной для интеграции, визуализации и передачи пользователям информации, позволяющей выполнять сравнительный анализ характеристик сырьевых геолого-минералогических ресурсов и осуществлять оценку тенденций распространения рудных узлов и месторождений. Геопространственные данные (цифровые геологические и минерагенические карты, карты физических полей, карты расположения месторождений полезных ископаемых и т.п.) формируют базу геопространственных данных (геоданных) проекта. База непрерывно пополняется в ходе работ по проекту. При этом имеется возможность добавления данных, предоставляемых участниками Программы. Доступ к формируемой базе осуществляется средствами специализированного геопортала. Формируемая и постоянно пополняемая база геоданных по стратегическому минеральному сырью России опубликована в форме картографического сервиса, доступ к которому открыт на веб-странице геопортала. Важной компонентой создаваемой ГИС является алгоритмическая составляющая, объединяющая современные алгоритмы кластерного анализа в единой геоинформационной среде. Одним из универсальных методов анализа пространственной информации является применение алгоритмов кластеризации, которые зарекомендовали себя в различных областях. Исследовательские работы в рамках проекта в 2015 г. велись по следующим основным направлениям: расширение базы геоданных и метаданных; разработка и оптимизация алгоритмов интеллектуального, автоматизированного анализа данных, их адаптация для работы с геоданными и интеграция в единую интеллектуальную ГИС.

### **8.1. Тематическая база геоданных проекта**

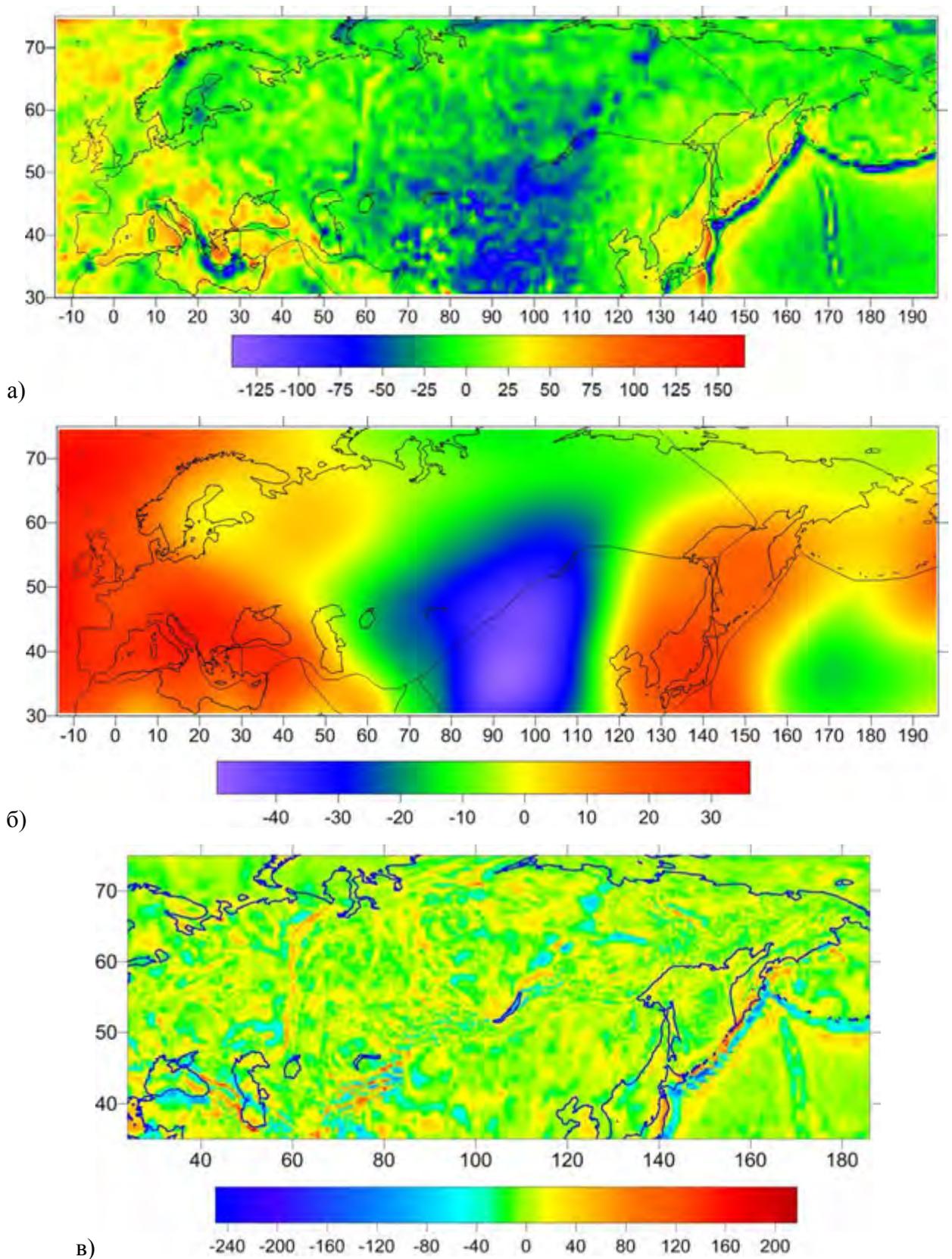
Одной из ключевых задач проекта является формирование и непрерывное пополнение тематической базы геоданных, организованной в форме картографического веб-сервиса.

В 2015 г. в базу геоданных проекта были включены данные по изостатическим аномалиям гравитационного поля [Kaban, 2001; Kaban et al., 2004]. Данный блок включает в себя три слоя данных:

- полное поле изостатических аномалий (рис. 8.1а);
- длинноволновая составляющая (длины волн  $> 2400$  км, соответствующая амплитуде 0,5 фильтра гауссового типа), отражающая глубинные плотностные неоднородности и динамические эффекты мантийной конвекции (рис. 8.1б);
- региональная и локальная составляющие поля изостатических аномалий, полученные после вычитания поля длинноволновой составляющей из исходного (рис. 8.1в).

Исходные данные для территории России и стран СНГ были представлены в табличном виде с шагом в 15' по долготе и 10' по широте. Для остальных территорий использованы интерполированные значения  $1^\circ \times 1^\circ$ . Для получения данных на регулярном интервале в среде ESRI ArcGIS 10 было выполнено интерполирование всего массива данных с шагом 5'. Значение каждого пикселя соответствует значению аномалии гравитационного поля в миллигалах (рис. 8.1).

Доступ к формируемой базе осуществляется средствами специализированного геопортала (<http://gis.gcras.ru/>). Формируемая и постоянно пополняемая база геоданных по стратегическому минеральному сырью России опубликована в форме картографического сервиса, доступ к которому открыт на веб-странице геопортала. Данный подход позволяет организовать доступ к данным непосредственно с компьютера пользователя без необходимости установки специализированного программного обеспечения. Доступ к публикуемым геоданным и метаданным осуществляется с использованием стандартных протоколов обмена картографической информацией, включая KML, HTML, XML, OGC-протоколы (WMS, WFS). Интерфейс геопортала предоставляет возможность использования различных вариантов представления геоданных с использованием современных сетевых сервисов, в виде файлов для настольных приложений ArcMap или ArcGIS Explorer или в виде интерфейса программирования приложений ArcGIS JavaScript API. Кроме того, пользователь имеет возможность использовать данный сервис в качестве составной части собственной базы геоданных. Таким образом, реализуется подход инфраструктуры пространственных данных, который подразумевает распределенное хранение пространственных данных без необходимости их концентрации в одной базе [Beriozko et al., 2011; Красноперов и др., 2015; Красноперов и Соловьев., 2015].



**Рисунок 8.1 – Изостатические аномалии гравитационного поля Земли [Кабан, 2001; Kaban et al., 2004]: а) полное поле изостатических аномалий; б) длинноволновая составляющая поля; в) региональная и локальная составляющие поля. Значения пикселей раstra приведены в миллигалах**

## 8.2. Внедрение методов кластерного анализа в среду ГИС

В 2015 г. в рамках проекта началось создание ГИС-ориентированной базы алгоритмов [Nikolov et al., 2015]. Это позволит объединить формальные математические конструкции в геоинформационной среде, и даст возможность создать аналитический инструментарий для работы с геолого-геофизическими данными, аккумулируемыми в рамках проекта. В 2015 г. в базу алгоритмов были включены как классические алгоритмы кластерного анализа (K-средних), так и алгоритмы, объединенные логикой дискретного математического анализа (ДМА) [Гвишиани и др., 2002а, 2002б; Mikhailov et al., 2003; Агаян, Соловьев, 2004; Соловьев и др., 2005; Гвишиани и др., 2010; Агаян и др., 2014; Agayan et al., 2014; Богоутдинов и др., 2015]: «Монолит», «Роден-2», «DPS» и его модификация.

Реализация библиотеки алгоритмов была выполнена в ГИС-среде ESRI ArcGIS. Программный пакет ESRI ArcGIS представляет собой современную географическую информационную систему, позволяющую строить вычислительные модели для анализа пространственной информации. С помощью этой технологии пользователь имеет возможность моделировать, редактировать цифровые картографические слои, управлять базами геоданных, а также создавать специализированные приложения. Для реализации алгоритмов кластеризации использовался один из компонентов пакета ESRI ArcGIS – ArcMap, который является основным приложением для работы с пространственными данными.

Реализация алгоритмов кластеризации «K-средних», «Монолит», «DPS» и его модификации была выполнена на языке Python, который является одной из основных сред разработчика, используемых в ArcGIS. Он позволяет достаточно легко решать множество задач пользователей путём написания необходимых скриптов. Язык разработки Python является непатентованным, имеет множество дополнительных библиотек, которые позволяют расширить его функциональность. Например, использование модуля NumPy помогает решать сложные математические и статистические задачи, так как содержит большой набор математических функций. Для работы с геоданными используется специальная новая библиотека ArcPy. Она содержит большое число ГИС-функций, а также значительно облегчает написание скриптов по анализу и обработке геофизических данных. Благодаря большому количеству хорошо документированных классов и функций, простоте загрузки в документ и запуска скрипта, множеству примеров и существованию библиотеки ArcPy, Python является популярным среди ГИС-разработчиков.

Для реализации алгоритма были подключены расширение NumPy, позиционирующееся как свободный и более мощный эквивалент системы MATLAB, а также расширение ArcPy, позволяющее производить анализ географических данных, конвертацию данных и автоматизацию карты в Python. Все алгоритмы кластеризации были реализованы на языке Python и представляют собой отдельные скрипты в формате *py*.

Для реализации библиотеки алгоритмов было принято решение создать инструменты-скрипты. Это позволяет превратить разработанные скрипты на языке Python

с определенной функциональностью в инструменты геообработки, которые будут работать так же, как и системные инструменты геообработки. Инструменты-скрипты обладают следующими преимуществами:

- они являются частью геообработки, как и другие системные инструменты, а также их можно запускать из окна Каталог или запускать из других скриптов;
- в окно Результаты можно записывать различные информационные сообщения;
- существует возможность подготовки необходимой документации с использованием встроенных инструментов документирования.

При запуске инструмента-скрипта появляется запрос на ввод параметров для работы алгоритма, а также выборку слоя для исследования и указание рабочей папки. Для алгоритма кластеризации «К-средних» требуется ввести три параметра: слой данных, количество кластеров, которое является целым положительным числом, и рабочую область (рабочую папку). Слой данных и рабочая область вводятся во всех алгоритмах кластеризации. Существуют некоторые требования к типу символов слоя данных, который подается на вход программы. Символы должны иметь тип «unique value» («уникальное значение»). Проверить тип символов слоя можно в свойствах слоя в разделе «Символы». Это требование необходимо для корректного отображения полученного результата в окне ArcMap.

Для алгоритмов «DPS» и его модификации на вход подаются значения параметра  $\omega$  ( $\omega < 0$ ) для нахождения радиуса близости и  $\beta \in [-1, 1]$ . Для алгоритма «Монолит» вводятся значения параметра  $\alpha \in [0, 1]$ , который задает уровень плотности, а также отрицательного параметра  $\omega$  для нахождения радиуса близости.

Перечисленные алгоритмы представлены в форме библиотеки сервисов геообработки. Каждый сервис геообработки реализуется с помощью языка Python с использованием библиотеки ArcPy. Программа построена по следующему принципу. На первом этапе происходит считывание параметров с помощью функции GetParameter. Определяется функция GetLayer, которая с помощью библиотек httplib, urllib, используя REST API, соединяется с нужным картографическим сервисом и в папке задачи записывает ответ – файл в формате JSON с помощью соответствующей библиотеки, далее преобразует его в тип слоя. Следующим этапом идет код произвольного алгоритма из числа доступных. По окончании работы сервиса на сервере создаются ресурсы, выходным параметрам сервиса присваиваются значения выходных слоев алгоритма с помощью функции SetParameter. Все временные файлы хранятся в папке задачи на сервере и удаляются с некоторой настраиваемой периодичностью.

### 8.3. Заключение

В рамках реализации мероприятий Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 5 «Месторождения стратегического сырья в России: инновационные подходы к их прогнозированию, оценке и добыче» с 2015 г. развивается современный высокопроизводительный инструмент для анализа геоданных о минерально-сырьевых

ресурсах России, обеспечивающий интерактивный доступ к данным и современным алгоритмам их интеллектуального анализа. Разрабатываемые подходы носят универсальный характер и, в частности, могут найти широкое применение при решении различных задач, возникающих в горных науках.

### 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. **Богоутдинов Ш. Р., Шустер В. Л., Агаян С. М., Цаган-Манджиев Т. Н., Кафтан В. И.** Оценка перспектив нефтегазоносности фундамента в центральной части Западной Сибири с применением алгоритмов нечеткой логики и системного анализа // Науки о Земле. 2015. № 2.
4. **Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р.** Математические методы геоинформатики. I. О новом подходе к кластеризации // Кибернетика и системный анализ. 2002а. № 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. № 2. Выпуск № 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. 2002б. № 7. С. 13–28.
7. **Красноперов Р. И., Лебедев А. Ю., Пятыгина О. О., Рыбкина А. И., Шibaева А. А.** Многодисциплинарная аналитическая ГИС для обработки и представления данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 50–54.
8. **Красноперов Р. И., Соловьёв А. А.** Аналитическая геоинформационная система для комплексных геолого-геофизических исследований на территории России // Горный журнал. № 10. 2015. С. 89–93.
9. **Соловьёв 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  $\delta T$  // Доклады АН. 2005. Т. 404. № 1. С. 109–112.
10. **Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R., Dobrovolsky M. N.** Discrete Perfect Sets and their application in cluster analysis // Cybernetics and Systems Analysis. 2014. Vol. 50. No. 2. P. 176–190.
11. Beriozko A., Lebedev A., **Soloviev A., Krasnoperov R., Rybkina A.** Geoinformation system with algorithmic shell as a new tool for Earth sciences // Russian Journal of Earth Sciences. 2011. Vol. 12. DOI:10.2205/2011ES000501
12. **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.
13. **Kaban M. K., P. Schwintzer, Ch. Reigber.** A new isostatic model of the lithosphere and gravity field // Journal of Geodesy. 2004. 78. P. 368–385.
14. Mikhailov V., Galdeano A., Diament M., **Gvishiani A., Agayan S., Bogoutdinov S., Graeva E., Sailhas P.** Application of artificial intelligence for Euler solutions clustering // Geophysics. 2003. Vol. 68. No. 1. P. 168–180.
15. **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. Vol. 15. No. 4. 2015. ES4004.

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

Номер гос. регистрации № 115082070008 (0145-2014-0009)

Руководитель проекта директор, академик А. Д. Гвишиани.

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

Целью исследования является разработка научного базиса и создание технологического задела в области геомагнитного сопровождения наклонно-направленного бурения скважин в Арктическом регионе РФ. Основной задачей исследования является оценка спорадических возмущений магнитного поля при магнитных бурях и суббурях в высоких широтах и исследование влияния этих возмущений на точность подземной навигации с помощью скважинной телеметрии в условиях российской Арктики, отработка методики фильтрации геомагнитных помех. Конечным итогом исследований является повышение точности наклонно-направленного бурения скважин в регионе.

В высоких широтах спорадические возмущения внешнего магнитного поля, связанные с магнитными (суб)бурями, вносят большую неопределенность в показания скважинных инклинометров, которые работают, ориентируясь на магнитный северный полюс. Минимизация погрешностей достигается путем применения современных моделей главного магнитного поля, моделей локальных магнитных аномалий, аэромагнитной съемки, а также измерениями вариаций поля на поверхности Земли непосредственно в районе проведения работ с помощью обсерваторий и фильтрацией спорадических геомагнитных возмущений, создаваемых электрическими токами, текущими в ионосфере.

Необходимость организации наблюдений за геомагнитным полем и корректной интерпретации результатов измерений обусловили развитие тесного сотрудничества между компаниями нефтегазового сектора и научными организациями, которые занимаются геомагнитными исследованиями. Деятельность по развертыванию и поддержке сети магнитных обсерваторий высшего стандарта качества международной сети Интермагнет на территории РФ, которую ведет ГЦ РАН, в 2015 году заключалась в полевых исследованиях локации для поиска географической точки для установки новой полярной магнитной обсерватории в районе п. Сабетта, Ямал. Также проводилась модернизация и дооснащение развернутых в предыдущие годы обсерваторий «Санкт-Петербург» (Выборгский район Ленинградской области) и «Климовская» (Коношский район Архангельской области). Разработана, протестирована и применяется процедура автоматического расчета квазиокончатальных магнитных данных Интермагнет с обсерваторий Российско-украинского центра геомагнитных данных, развернутого в ГЦ РАН.

В целях прогнозирования наземных геомагнитных вариаций разработана статистическая модель поля геомагнитных вариаций (ПГВ) в высоких широтах северного полушария. Модель включает в себя построение регрессионных соотношений между

вариациями магнитных элементов на выбранных обсерваториях и внешними управляющими параметрами. В качестве управляющих параметров рассматриваются характеристики солнечного ветра (СВ), включая результаты прямых измерений и рассчитанные по этим данным геоэффективные функции, а также индексы магнитной активности. Модель включает в себя многофакторную линейную регрессию и метод главных компонентов. С помощью моделирования можно предсказать зависимость локальных геомагнитных возмущений от параметров СВ и в определенной степени спрогнозировать геомагнитную активность в заданной точке.

Полный спектр работ включал в себя теоретические (изучение локальных аномалий и вариаций геомагнитного поля в высоких широтах) и прикладные (методические и технологические работы по развертыванию обсерваторий) задачи. По итогам исследований в 2015 г. опубликованы две научные статьи в журналах, входящих в WoS, Scopus, РИНЦ:

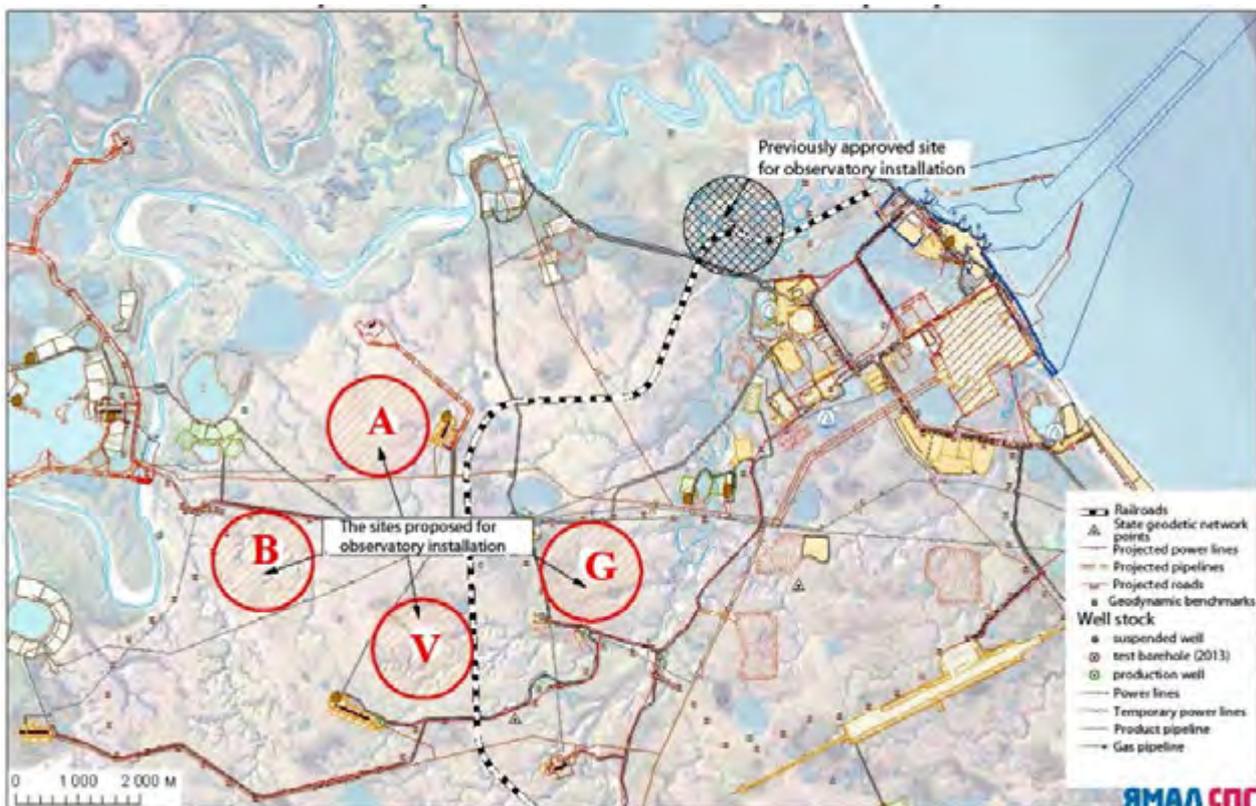
1. Гвишиани А. Д., Лукьянова Р. Ю. Геоинформатика и наблюдения магнитного поля Земли: российский сегмент // Физика Земли. 2015. № 2. С. 1–18.
2. Гвишиани А. Д., Лукьянова Р. Ю. Исследование геомагнитного поля и проблемы точности бурения наклонно направленных скважин в Арктическом регионе // Горный журнал. 2015. № 10 (2219). С. 94–99.

Также опубликована статья в сборнике трудов Всероссийской научной конференции «Арктика: нефть и газ – 2015»: Гвишиани А. Д., Лукьянова Р. Ю. Исследование геомагнитного поля в приложении к проблеме точности наклонного бурения скважин в арктическом регионе.

### **9.1. Развитие системы геомагнитных наблюдений, увеличение числа обсерваторий и объема данных наблюдений геомагнитного поля в Арктике, усовершенствование методов обработки**

В сентябре 2015 г. сотрудниками ГЦ РАН выполнены полевые магнитоградиентометрические работы на двух локациях, выбранных в окрестностях вахтового поселка Сабетта (Ямало-Ненецкий автономный округ). Исследованные локации на карте (рис. 9.1) обозначены буквами А и G.

Проведено обустройство магнитной обсерватории «Климовская», функционирующей на базе геобиостационара «Ротковец» Института физиологии природных адаптаций Уральского отделения Российской академии наук. Полный комплект приборов был установлен в 2014 г., и с осени 2014 г. «Климовская» функционирует как полноценная магнитная обсерватория, на ней производятся регулярные абсолютные наблюдения. В 2015 г. в процессе командировки сотрудников Геофизического центра РАН на магнитную обсерваторию был выполнен еще ряд работ по ее техническому оснащению, в частности, ремонт и отладка системы сбора и передачи данных, замена кабелей питания, повторное определение азимута визирной цели и покрасочные работы.



**Рисунок 9.1 – Предлагаемые места для установки магнитной обсерватории в окрестностях п. Сабетта**

Проведены технические работы на магнитной обсерватории «Санкт-Петербург», выполнены ремонтно-технические работы по улучшению передачи данных в ГЦ РАН и проверка ориентации датчиков векторного магнитометра. Закуплена и установлена антенна для усиления 3G-сигнала сотовой сети, в компьютере системы сбора данных установлено программное обеспечение для 3G-модема. На компьютере системы сбора данных настроен удалённый доступ к нему из ГЦ РАН. Программное обеспечение компьютера системы сбора данных обновлено до актуальной версии. Произведена проверка установки векторного магнитометра в вариационном павильоне, устранены источники помех в записях геомагнитных вариаций, регистрируемых векторным магнитометром.

Разработана система автоматического расчета квазиокончатальных магнитных данных в Российско-украинском центре геомагнитных данных. Для расчета полных значений элементов поля с частотой дискретизации, соответствующей исходным вариационным измерениям, требуется регуляризация базисных значений. Согласно требованиям Интермагнет, такая регуляризация должна обеспечивать шаг дискретизации 1 сутки с привязкой регулярных базисных значений к 12:00:00 UT каждых суток. Блок-схема процедуры приведена на рис. 9.2. Используя разработанную систему, в 2015 г. были подготовлены и предоставлены в Исполком Интермагнет окончательные данные обсерватории «Арти» за 2014 г.

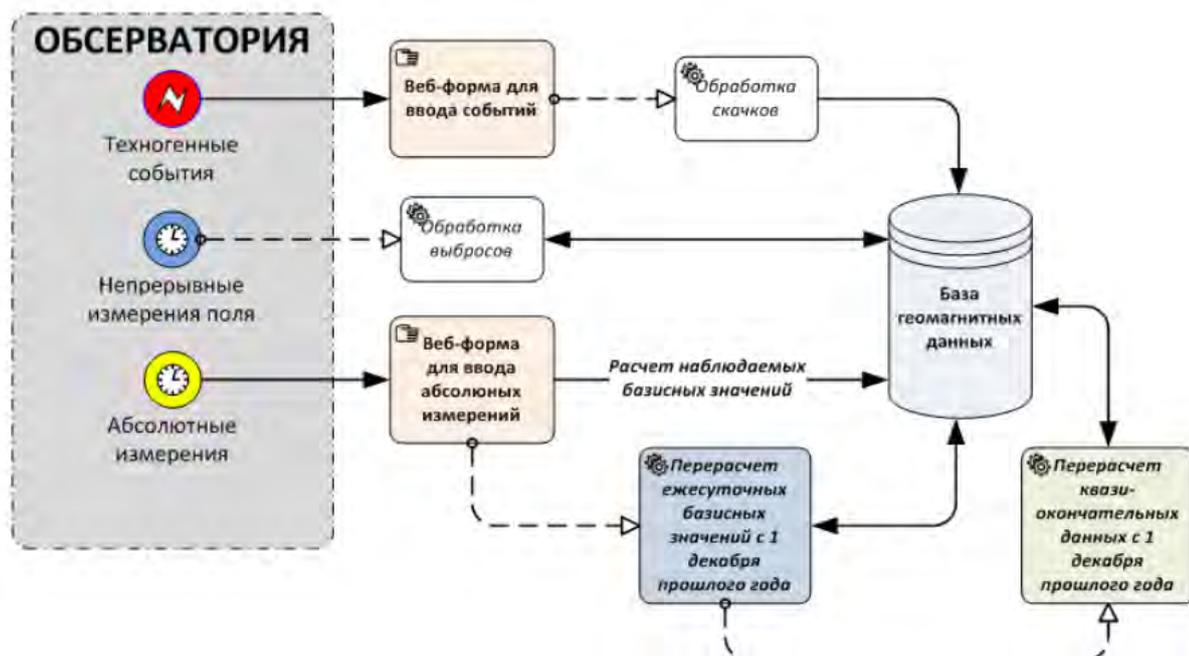


Рисунок 9.2 – Блок-схема автоматизированной системы расчета квазиокончательных данных Российско-украинского центра геомагнитных данных

## 9.2. Методы выделения и классификации спорадических возмущений геомагнитного поля в высоких широтах, связанных с солнечной активностью и характеристиками магнитосферы и ионосферы

Наиболее интенсивные магнитные возмущения на поверхности Земли происходят в авроральной зоне во время магнитосферных суббурь. На северных территориях РФ в арктической зоне амплитуда спорадических возмущений может достигать нескольких тысяч нТл, изменяясь на минутном и секундном временном масштабе.

Начало суббури  $t_0$  идентифицируется по значениям аврорального индекса геомагнитной активности  $AL$  (рассчитывается и публикуется Центром геомагнитных данных Киото, Япония, [www.kugi.kyoto-u.ac.jp](http://www.kugi.kyoto-u.ac.jp)) в 30-мин. скользящем временном окне, если:

$$AL(t_0+1) - AL(t_0) < -15 \text{ нТл},$$

$$AL(t_0+2) - AL(t_0) < -30 \text{ нТл},$$

$$AL(t_0+3) - AL(t_0) < -45 \text{ нТл},$$

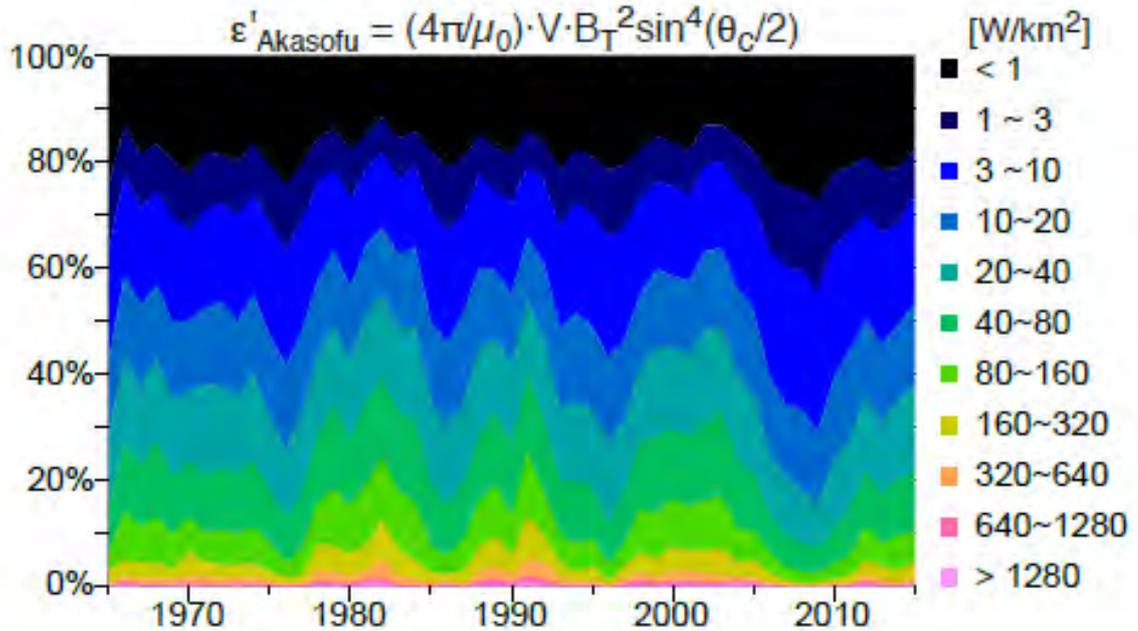
$$\sum_{i=4}^{29} \frac{AL(t_0+i)}{26} - AL(t_0) < -100 \text{ нТл}.$$

Во время мировых магнитных бурь происходят глобальные возмущения, охватывающие все широты. Геомагнитная буря относится к разряду экстремальных природных процессов, при которых геомагнитное поле наиболее возмущено. Величина бури определяется количеством энергии, поступающей из солнечного ветра в магнитосферу Земли. Для количественной оценки этой энергии применяется параметр

$$\varepsilon' = (4\pi/\mu_0) \cdot V_{sw} \cdot B_t^2 \cdot \sin^4(\theta_c/2),$$

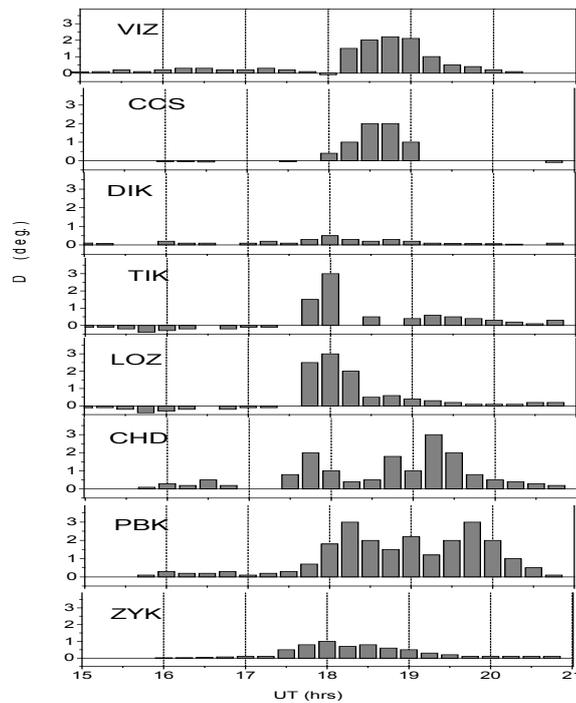
где  $V_{sw}$  – скорость СВ,  $B_t = \sqrt{B_z^2 + B_y^2}$ ,  $\cos(\theta_c) = B_z / B_{tan}$ .

На рис. 9.3 представлена доля (в %) среднегодовых значений параметра  $\varepsilon'$  по диапазонам, соответствующим количеству поступающей энергии. Можно видеть, что экстремальный солнечный ветер доминирует ~5% времени, а ветер средней интенсивности – до 50%.



**Рисунок 9.3 – Среднегодовые значения параметра  $\varepsilon'$ . Цветом показаны различные диапазоны  $\varepsilon'$ , соответственно количеству поступающей в магнитосферу энергии СВ от < 1 до > 1 280 Вт/км<sup>2</sup>**

Проведена оценка отклонений магнитных элементов от спокойного уровня на станциях, расположенных в АЗРФ, во время магнитной бури. Внешнее геомагнитное поле изменяется в большом диапазоне частот от  $10^{-4}$  до  $10^4$  Гц. Амплитуда вариаций может достигать  $10^3$  нТл, при этом наибольшие возмущения происходят в авроральной зоне ( $60\text{--}75^\circ$  MLat) во время магнитосферных суббурь, которые могут происходить каждый день и чаще. Почти постоянно происходят магнитные пульсации амплитудой от 5 до 20 нТл. На рис. 9.4 показаны 15-минутные значения вариации  $D$  (отклонения от спокойного уровня) на каждой станции. Можно видеть, что во время бури в течение нескольких часов отклонение  $D$ , обусловленное спорадическими изменениями внешнего геомагнитного поля, превышало  $3^\circ$ , тогда как допустимая погрешность отклонения от траектории при бурении скважины составляет  $0,05^\circ$ .



**Рисунок 9.4 – 15-минутные значения вариаций D в период 15–21 UT, 14 July 2000, на российских станциях, расположенных в широтном диапазоне 60–75° MLat**

### **9.3. Статистическая модель наземных вариаций геомагнитного поля в зависимости от параметров СВ и индексов геомагнитной активности**

Для прогнозирования изменчивого ПГВ в высоких широтах необходима модель, учитывающая влияние авроральных электроджетов, энергии, поступающей из СВ, и других факторов. Модель основана на многофакторной линейной регрессии и методе главных компонент. В качестве управляющих параметров используются три набора характеристик: (1) данные прямых измерений СВ и ММП, (2) геоэффективные функции CF (комбинации параметров СВ и ММП) и (3) планетарные геомагнитные индексы. Исходным материалом для построения регрессионной модели служат минутные значения наземных геомагнитных вариаций. Связи между геомагнитными вариациями и управляющими параметрами определялись по коэффициенту корреляции для линейной регрессии между значениями наземных вариаций  $\delta B_N$ ,  $\delta B_E$  и  $\delta B_V$  на каждой станции и управляющими параметрами. Результаты анализа позволяют построить многофакторную линейную регрессионную модель зависимости поля локальных возмущений геомагнитного поля от наборов параметров СВ, ММП, CF и индексов. Линейная модель формулируется в виде:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{1i} + \dots + \beta_k \cdot x_{ki} + \epsilon_i, i=1, \dots, n,$$

где  $y_i$  – наземные магнитные возмущения в компонентах  $\delta B_N$ ,  $\delta B_E$  и  $\delta B_V$ ,  $x_{ki}$  – управляющие параметры,  $\beta_k$  – коэффициенты регрессии,  $\epsilon_i$  – параметры ошибки.

В матричной форме предыдущее уравнение записывается как

$$\mathbf{y} = \mathbf{X} \cdot \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\epsilon},$$

а минимум  $\beta$  (в смысле наименьших квадратов) рассчитывается как

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y.$$

Ковариационная матрица  $X^T X$  представляет собой корреляционную матрицу. Так как переменные  $\{x_{ki}\}$  имеют различную размерность, они должны быть нормализованы путем вычитания среднего значения и деления на величину стандартного отклонения. Численные эксперименты показывают, что при расчете линейной регрессии по  $\delta B_N$ ,  $\delta B_E$  и  $\delta B_V$  получается, что коэффициенты  $\beta$  и реконструированные по ним значения  $y$  могут содержать значительную ошибку, поскольку управляющие параметры часто взаимокоррелированы. Для улучшения ортогональности векторов можно применить метод главных компонент с вычислением наибольших собственных чисел матрицы и выделить наиболее влиятельные управляющие параметры. Для  $k$  переменных определяются  $k$  ортогональных собственных векторов (факторов), каждый из которых состоит из линейной комбинации всех управляющих параметров. Величина  $\gamma_k$  показывает относительную значимость каждого вектора, а доля результата, которая объясняется  $p$  из  $k$  факторов, рассчитывается как

$$Var = \frac{\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_p}{\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_k} \times 100\%.$$

Полученный набор факторов является ортогональным и может быть использован для реконструкции полей  $\delta B_N$ ,  $\delta B_E$  и  $\delta B_V$ . Оценка эффективности проводится по величине

$$PE = 1 - \frac{\sum_i (y_{obs} - y_{mod})^2}{\sigma_{obs}^2},$$

где  $y_{obs}$  и  $y_{mod}$  – соответственно, измеренные и рассчитанные значения ПГВ.

Тестовые расчеты по прогнозированию ПГВ с помощью регрессионной модели показывают, что возмущения на всех широтах определяются не одним управляющим параметром, а их набором, состоящим по крайней мере из шести факторов. Для высоких и средних широт наборы факторов различаются. Для диапазона широт  $M_{Lat}=40-60^\circ$  наиболее значимыми являются  $\epsilon$ ,  $B_S$ ,  $V_t B_t$ ,  $SYM\_H$ ,  $SYM\_D$ ,  $Pd$ ,  $AE$ , причем для  $\delta B_N$ ,  $\delta B_E$  и  $\delta B_V$  комбинации параметров различаются. В высоких широтах наиболее значимыми становятся  $E_{KL}$ , ММП  $B_y$ ,  $V_t B_t$ ,  $AL$ ,  $AE$ ,  $PC$ . С ростом амплитуды возмущений точность реконструкции уменьшается. Тем не менее, для относительно спокойных условий представляется возможным моделировать поля возмущений достаточно детально.

## **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 № 115082070006 (0145-2014-0010)

Руководитель проекта директор, академик А. Д. Гвишиани.

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

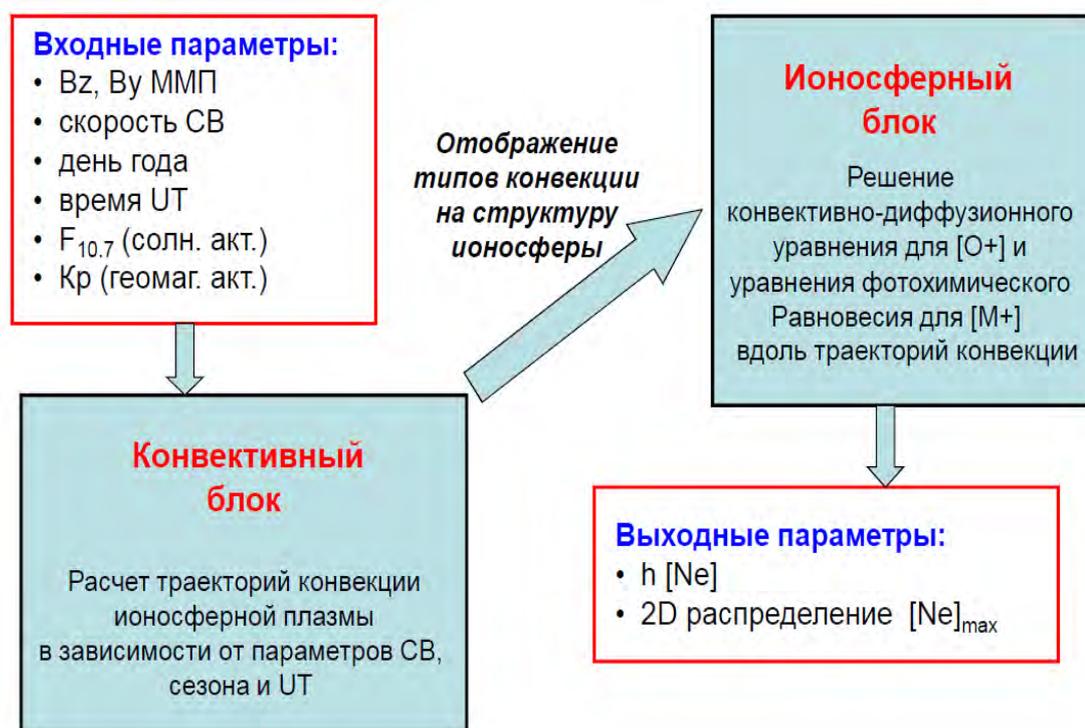
Разработана численная физико-математическая модель F области высокоширотной ионосферы с учетом влияния электрических полей магнитосферного происхождения на распределение электронной концентрации  $N_e$  в F слое. Модель позволяет оперативно рассчитывать трехмерную структуру полярной, авроральной и субавроральной ионосферы при различных гелио-геофизических условиях. Траектории конвекции плазменных трубок моделируются в блоке расчёта ионосферных электрических полей с непрерывной зависимостью их геометрии и интенсивности от входных параметров в виде значений межпланетного магнитного поля, скорости солнечного ветра, дня года, мирового времени и уровня геомагнитной и солнечной активности. В ионосферном блоке для соответствующего топологического типа конвекции с учётом временной эволюции плазменных трубок рассчитывается высотное распределение  $N_e$ . Учитываются обобщенный молекулярный ион  $M^+$  и ион кислорода  $O^+$ , концентрация которых определяется соответственно решением уравнения баланса и конвективно-диффузионного уравнения вдоль траектории конвекции с учётом поля коротации и параметров термосферы. Модель реализована в виде пакета программ и адекватно воспроизводит основные крупномасштабные неоднородности в высокоширотной ионосфере. Разработана методика расчета плотности электрических токов магнитосферного происхождения – продольных токов, текущих в/из ионосферы Земли вдоль силовых линий геомагнитного поля, по выделенному в данных измерений спутников Swarm магнитному сигналу этих токов.

### **10.1. Численная модель F области высокоширотной ионосферы с учетом влияния параметров межпланетной среды**

Численная модель рассчитывает 3D распределение электронной концентрации  $N_e$  в полярной ионосфере в области выше  $50^\circ$  магнитной широты (MLat). Основными факторами, определяющими состояние высокоширотной ионосферы, являются динамика плазмы и процессы образования и химических потерь ионов. Соответственно управляющим факторам, модель состоит из двух блоков.

В первом блоке, назовем его «конвективным», с целью определить траектории, вдоль которых дрейфует плазменная трубка, рассчитываются геометрические и электродинамические параметры картин конвекции. Так как в F области плазма замагничена, линии конвекции совпадают с изолиниями ионосферного электрического

потенциала. Ионосферные электрические поля возбуждаются продольными токами (ПТ), которые текут вдоль силовых линий геомагнитного поля и связывают ионосферу с пограничными слоями магнитосферы и солнечным ветром. ПТ контролируются межпланетным магнитным полем (ММП) и непрерывно изменяются с изменением параметров солнечного ветра и солнечным зенитным углом (сезоном года и мировым временем). В рамках модели величина и геометрия ПТ, ионосферного электрического поля и широты границы полярной шапки параметризованы и описываются соответствующими аналитическими формулами. Адекватное описание электродинамики высокоширотной ионосферы является основным достоинством модели и отличает ее от других существующих моделей, которые работают только на широтах ниже аврорального овала. Во втором блоке, собственно «ионосферном», решается одномерная задача интегрирования по высоте нестационарного конвективно-диффузионного уравнения и уравнения фотохимического равновесия в вертикальной плазменной трубке, дрейфующей под действием электрических полей магнитосферной конвекции и коротации. На рис. 10.1 представлена блок-схема численной модели. Входными параметрами модели являются значения  $V_z$  и  $V_y$  ММП, скорость солнечного ветра  $V_{СВ}$ , день года (DOY) и универсальное время (UT), а также индексы солнечной и геомагнитной активности.



**Рисунок 10.1 – Схема численной модели высокоширотной ионосферы**

В конвективном блоке численной модели производится расчет пространственно-временной структуры конвекции плазменных трубок. Будем считать, что ионосфера является тонкой проводящей сферической оболочкой на высоте 200 км от поверхности Земли. Электрическое поле магнитосферного происхождения картируется без изменения вдоль плазменной трубки. Уравнения траектории конвекции записываются в геомагнитных сферических координатах  $r, \theta, \varphi$  ( $r$  – радиус,  $\theta$  – коширота,  $\varphi$  –

геомагнитная долгота). Скорость движения заряженной частицы определяется суммой скорости ковращения  $V_K = (0, 0, \omega \cdot r \cdot \sin\theta)$  и скорости дрейфа  $V_D$  в скрещенных электрическом ( $E$ ) и магнитном ( $B$ ) полях  $V_D = (-E_\varphi B_\theta/B, E_\varphi B_r/B, (E_r B_\varphi - E_\theta B_r)/B)$ .

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

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

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

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

Аналитическое описание распределения электрического поля базируется на непрерывном изменении профиля электрического поля утро–вечер ( $E_{y-v}$ ) в зависимости от параметров ММП и СВ, геомагнитной активности, сезона. Представлены профили электрического поля вдоль меридиана утро–вечер для девяти различных комбинаций знаков  $V_y$  и  $V_z$  ММП, включая нулевые значения. Величина  $V_{СВ}$  принята постоянной. Топологические различия в форме профилей проявляются при изменении ориентации ММП. Так, при  $V_z \leq 0$  поле внутри полярной шапки постоянно и противоположно по знаку полю в авроральной зоне, а при  $V_z > 0$  в околополюсной области поле меняет знак. Переход от условий  $V_z > 0$  к  $V_z < 0$  ведёт к расширению авроральной зоны и общему усилению поля. При  $V_y=0$  картина симметрична относительно меридиана полдень–полночь. Рост интенсивности  $V_y$  компоненты ММП ведет к усилению электрического поля в вечернем или утреннем секторе полярной шапки, соответственно, при  $V_y > 0$  или  $V_y < 0$ . Таким образом, геометрические и электродинамические характеристики распределений поля определяются входными параметрами модели в виде  $V_y$  и  $V_z$  компонент ММП.

Профили  $E_{y-v}$  можно объединить в шесть топологически одинаковых групп. Тип топологии зависит от ориентации ММП, т.е. сочетания знаков  $V_z$  и  $V_y$ , а амплитуда профиля – от интенсивности  $V_z$  и  $V_y$ . Соответственно, двумерные картины конвекции ионосферной плазмы для различных сочетаний параметров межпланетной среды, рассчитанные без учёта эффекта коротации, обнаруживают 2-, 3- и 4-вихревые структуры.

Учёт электрического поля коротации видоизменяет структуру траекторий конвекции и ведёт к появлению застойной области между вечерним и ночным меридианами.

Ионосферный блок описывает трёхмерное распределение  $Ne$  в высокоширотной F области. В точках, расположенных вдоль траекторий конвекции, решается одномерная задача интегрирования нестационарного конвективно-диффузионного уравнения для иона кислорода  $O^+$ :

$$\frac{\partial}{\partial t} n(O^+) = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \cdot \frac{\partial}{\partial z} n(O^+) + R \cdot n(O^+) \right) + Q_{O^+} - L$$

и уравнения фотохимического равновесия для концентрации обобщенного молекулярного иона  $M^+$ :

$$Q_M^+ + L = \alpha n(M^+) \cdot (n(M^+) + n(O^+)),$$

где  $n(O^+)$  и  $n(M^+)$  – концентрация,  $t$  – время,  $z$  – высота,  $Q_{O^+}$  и  $L$  – скорость образования и потерь ионов  $O^+$ ,  $\alpha$  – эффективный коэффициент рекомбинации.

На нижней границе ионосферы ( $\sim 130$  км) задаётся концентрация  $n(O^+)$  из условия фотохимического равновесия, а на верхней – величина уходящего потока. Верхняя граница ионосферы выбрана на фиксированной высоте 600 км с заданием граничного условия на поток ионов  $O^+$ .

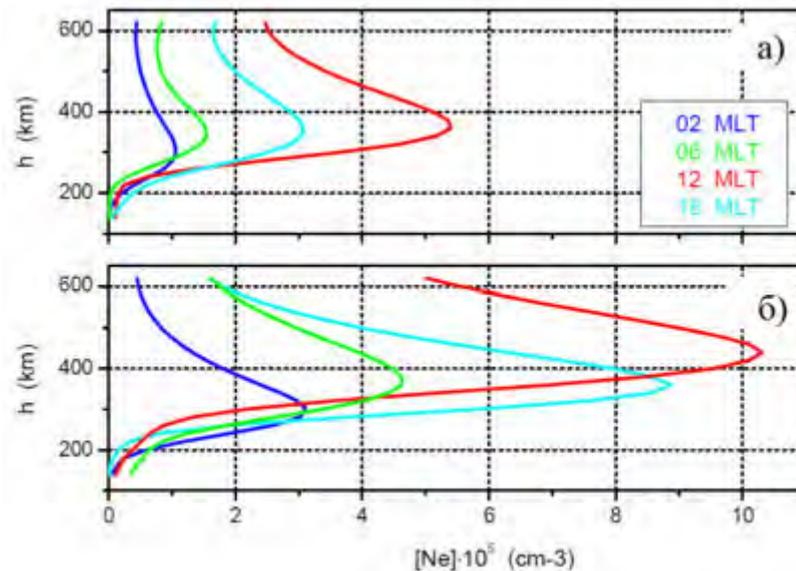
Для сокращения времени расчета параметры термосферы не моделируются внутри ионосферного блока, а задаются на основе известных эмпирических моделей.

Таким образом, в ионосферном блоке при заданных гелиогеофизических условиях, дне года и моменте мирового времени рассчитывается высотное распределение  $Ne$  в любом заданном наборе точек на сетке, покрывающей высокоширотную область. При этом на первом этапе осуществляется расчёт траекторий конвекции вспять по времени для определения стартовой точки, удалённой настолько, чтобы избежать влияния неопределенности начальных условий на высотный профиль  $Ne$  в требуемой точке. Затем вдоль полученной траектории производится численное решение уравнений (3) и (4).

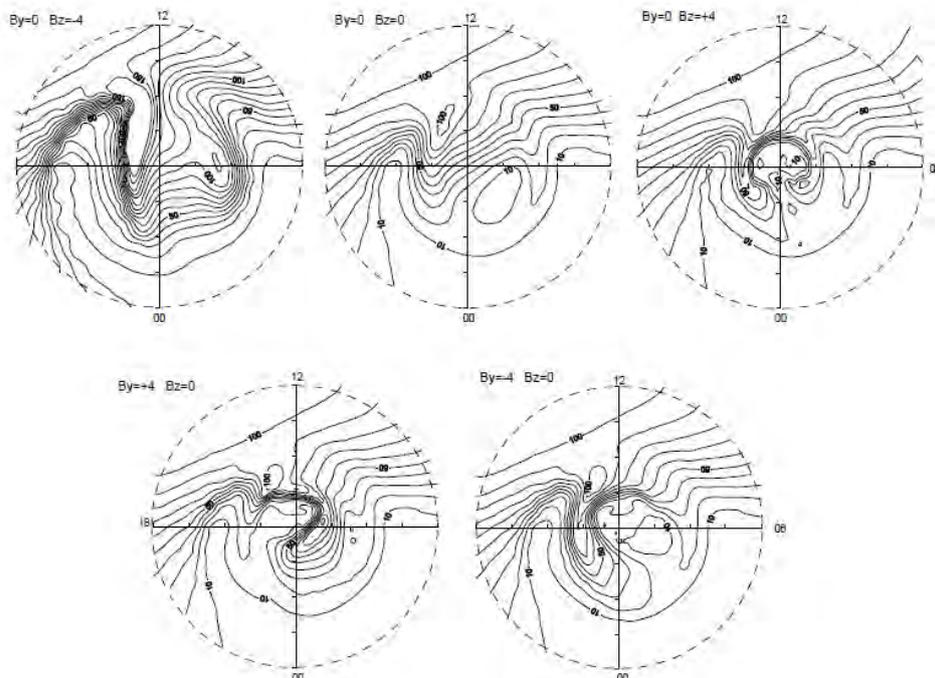
Модель позволяет получать высотное распределение  $Ne$  в заданной географической точке, а также строить двумерные картины изолиний максимума электронной концентрации  $(Ne)_{max}$ . На рис. 10.2 представлен пример высотных профилей  $Ne$  от 130 до 600 км на геомагнитной широте  $M\text{Lat} = 75^\circ$  в зимних условиях при северном и южном ММП на четырёх меридианах, соответствующих 02, 06, 12 и 18 часам местного магнитного времени (MLT). Можно видеть, что наибольшие значения  $Ne$  наблюдаются в полуденные и вечерние часы MLT. При повороте ММП к югу  $Ne$  увеличивается почти вдвое, а высота  $(Ne)_{max}$  увеличивается на десять и более километров.

Изменение значений входных параметров модели полярной ионосферы оказывает заметное влияние на структуру изолиний  $(Ne)_{max}$ . На рис. 10.3 в геомагнитных координатах представлены изолинии  $(Ne)_{max}$  для различных знаков  $B_z$  и  $B_y$  ММП. Вследствие важной роли конвекции плазмы в формировании крупномасштабных ионосферных неоднородностей в полярной ионосфере, ориентация ММП является определяющим фактором для распределения  $Ne$ , особенно в зимний сезон. Эффект смены знаков  $B_z$  и  $B_y$  ММП проявляется в явно выраженном изменении общей структуры изолиний  $(Ne)_{max}$ , что является следствием топологически различных типов конвективного дрейфа плазменных трубок под действием электрических полей магнитосферной конвекции. Так, при повороте ММП от юга к северу значения  $(Ne)_{max}$  в целом уменьшаются, изменяется положение и форма языка ионизации, проявляется полярная полость, полярная стенка ГИП смещается к северу. При  $B_y > 0$  полярный язык ионизации вытянут от полуденного меридиана на утреннюю сторону, а при  $B_y < 0$  – на вечернюю. Такое изменение структуры ионосферы находится в полном соответствии с

увеличением напряжённости электрического поля и более интенсивном конвективном дрейфе плазмы в утреннем или вечернем секторах местного времени вследствие усиления процессов пересоединения магнитных силовых линий на утреннем или вечернем фланге магнитосферы при изменении знака ММП  $B_y$ .



**Рисунок 10.2 – Высотные профили  $Ne$  для ночного, дневного, утреннего и вечернего меридианов на геомагнитной широте  $M\text{Lat}=75^\circ$  для условий ММП  $B_z=+5$  нТл (а) и  $B_z=-5$  нТл (б). Другие параметры: ММП  $B_y=0$ ,  $DOY=360$ ,  $UT=0$ ,  $K_p=2$ ,  $F_{10.7}=220$**



**Рисунок 10.3 – Карты изолиний  $(Ne)_{max} \cdot 10^4$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) при различной ориентации ММП.**

**Верхний ряд слева направо (а):  $B_z = -4, 0, +4$  нТл;  $B_y = 0$ .**

**Нижний ряд слева направо (б):  $B_y = +4, -4$  нТл;  $B_z = 0$ .**

**Карты построены в геомагнитных координатах в области  $M\text{Lat} > 50^\circ$ .**

**Другие входные параметры:  $V_{\text{св}}=400$  км/с,  $DOY = 360$ ,  $K_p = 2$ ,  $F_{10.7} = 150$ ,  $UT=18$**

## 10.2. Методы построения статистической модели распределения крупномасштабных продольных токов по данным спутниковых наблюдений вариаций магнитного поля над ионосферой

Задача обнаружения и измерения ПТ решается путем спутниковых измерений магнитного поля в пространстве над ионосферой, которые осуществляются в настоящее время тремя спутниками группировки Swarm. Накопление достаточно большого количества данных измерений вариаций магнитного поля вдоль траектории пролета на высоте ~450 км открывает возможности построения новой статистической модели ПТ, параметризованной по направлению и интенсивности ММП и величине солнечного зенитного угла. Алгоритм расчета плотности крупномасштабных ПТ по магнитному сигналу основан на расчете градиента компоненты магнитного поля, направленной поперек траектории пролета. На данном этапе вариацию компоненты поля  $\delta B_y$ , направленной перпендикулярно траектории пролета, т.е. приблизительно зональной, будем считать пренебрежимо малой. Значение плотности ПТ  $j_z$  (ось  $z$  направлена вертикально) пропорционально пространственному градиенту магнитной индукции  $\mathbf{B}$  и при условии, что спутник пересекает бесконечно вытянутый слой тока, вычисляется по формуле:

$$j_z = \frac{d}{dy} \delta B_x.$$

Пример рассчитанной плотности ПТ по соответствующей ему магнитной вариации, измеренной вдоль траектории, представлен на рис. 10.4.

Разработан метод многофакторной сортировки на пространственной сетке данных  $j_z$  для параметризации модели в зависимости от набора гелио-геофизических условий.

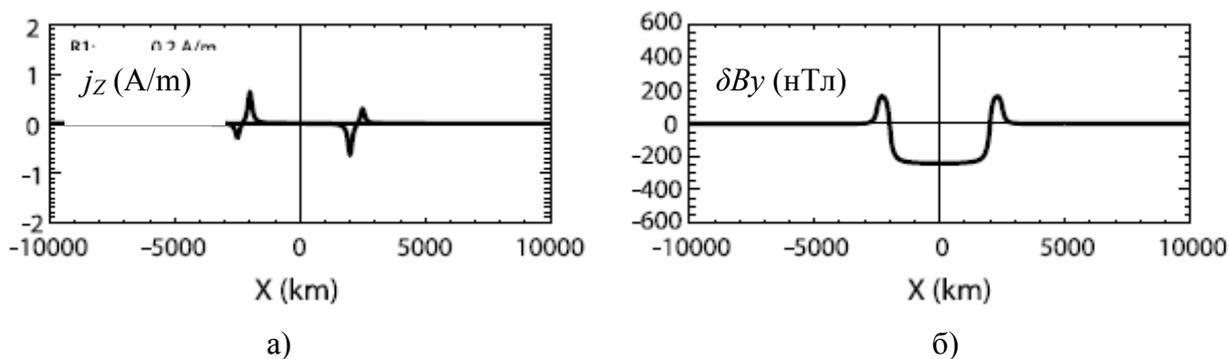


Рисунок 10.4 – (а) Плотность ПТ  $j_z$  и (б) соответствующая вариация  $\delta B_y$ . Ось  $x$  направлена вдоль траектории пролета спутника через полярную область северного полушария, магнитный полюс в центре

### Публикации 2015 года

1. Uvarov V. M. and Lukianova R. Yu. Numerical modeling of the polar F region ionosphere taking into account the solar wind conditions // Adv. Space Research. 56. 2563–2574. DOI:10.1016/j.asr.2015.10.004, 2015 (IF 2014 – 1,38).

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

Номер гос. регистрации № 115082070007 (0145-2015-0008)

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

Ответственный исполнитель к.ф.-м.н. Р. И. Краснопёров

Разрабатываемая в рамках Программы ОНЗ № 7 ГИС «Данные наук о Земле по территории России» направлена на решение задачи сбора, хранения и анализа геопро пространственных данных (геоданных). Система является веб-ориентированной и не требует от пользователя дополнительных программных и аппаратных средств и специфических навыков. Доступ к данным в разрабатываемой ГИС осуществляется посредством тематических картографических веб-сервисов на основе стандартов обмена пространственными данными, принятых международной организацией OGC (Open Geospatial Consortium – открытый геопро пространственный консорциум). Данный подход является в настоящее время наиболее гибким, поскольку позволяет предоставлять широкому кругу пользователей доступ к многочисленным тематическим данным. Для решения задачи анализа и интерпретации пространственных данных в среде ГИС возможно использовать как классические алгоритмы пространственного анализа, так и специализированные, созданные на основе современных математических подходов.

## **11.1. Расширение базы геопро пространственных данных ГИС**

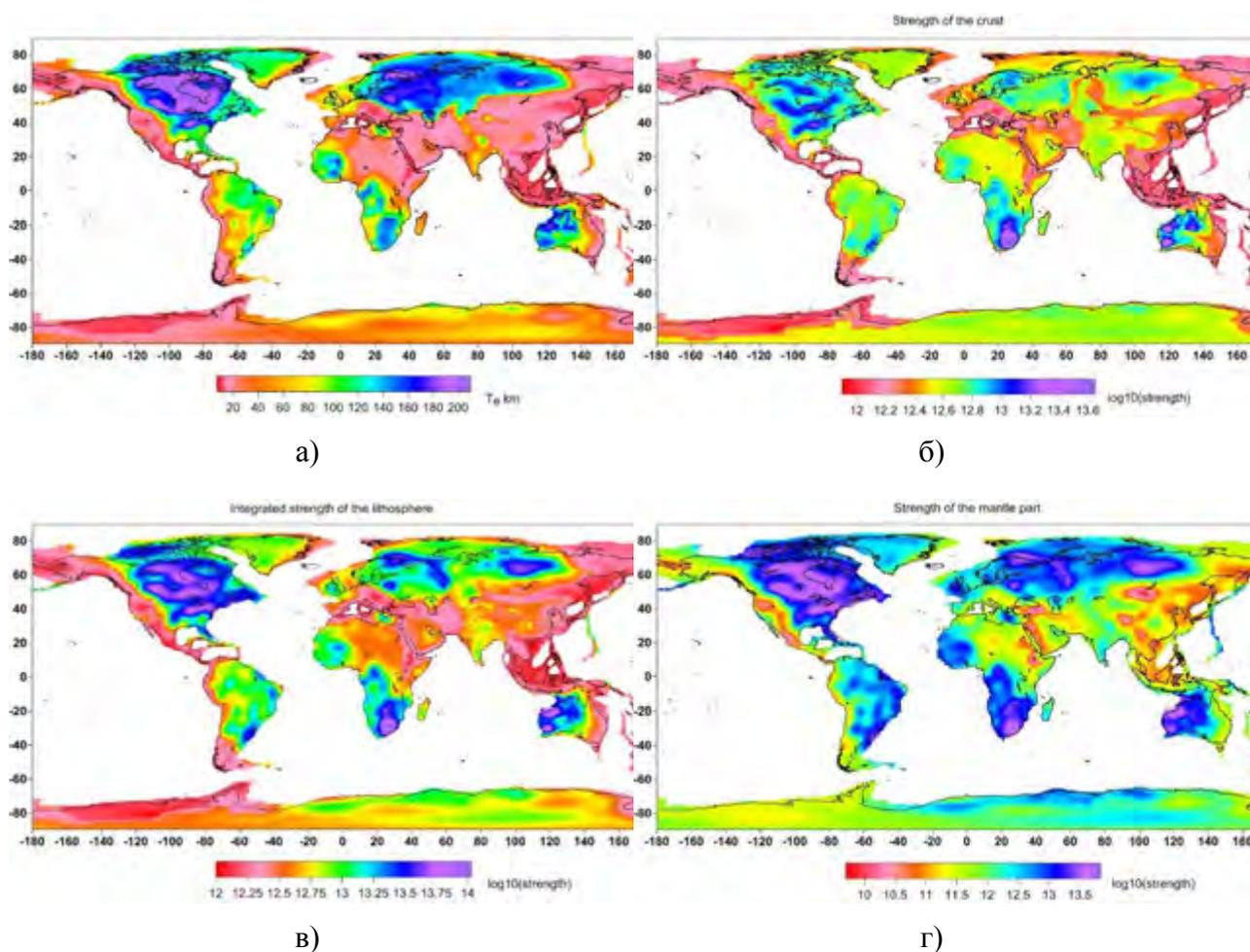
Одной из решаемых задач в рамках проекта в 2015 г. было расширение базы геоданных ГИС «Данные наук о Земле по территории России».

### **11.1.1. Реологические параметры континентальной литосферы**

Параметры прочности литосферы определяют, какие напряжения способны выдерживать слои литосферы под действием внешних воздействий. В рамках проекта представлены данные по распределению прочности различных слоев литосферы на основании новейших данных о ее строении. Также представлено распределение другого важного параметра, эффективной мощности упругой литосферы ( $T_e$ ), которая напрямую связана с реакцией литосферы на прилагаемую нагрузку [Burov and Diament, 1995].

В качестве исходных данных были использованы данные о глубине Границы Мохоровичича и распределение температуры. Глубина до границы Мохоровичича основана на глобальной модели коры CRUST 2.0 [Bassin et al., 2000], улучшенной для регионов Северной Америки, Евразии и Австралии на основании новых региональных моделей [Mooney and Kaban, 2010; Tesauro et al., 2008, 2013]. Было получено четыре набора данных с пространственным разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$ , из которых были сформированы тематические слои: эффективная мощность упругой литосферы; прочность земной коры; прочность литосферы в целом; прочность мантийной части литосферы (рис. 11.1).

Эффективная мощность упругой литосферы представлена значениями в километрах. Этот параметр характеризует упругую деформацию литосферы под действием нагрузки (лёд, топография и пр.). Прочность земной коры, литосферы и мантийной части литосферы представлена десятичным логарифмом  $\lg(\text{Па}\cdot\text{м})$ . Средствами программного пакета ESRI ArcGIS слои были оформлены в виде цифровых карт, которые затем были добавлены в базу геоданных ГИС, а также опубликованы как часть картографического веб-сервиса «Геофизика». На добавленные слои данных были подготовлены файлы метаданных с подробным описанием.



**Рисунок 11.1 – Реологические параметры континентальной литосферы:**  
**а) эффективная мощность упругой литосферы; б) прочность земной коры; в) прочность литосферы в целом; г) прочность мантийной части литосферы.**  
**Значения даны только для районов с континентальным и переходным типом коры**

### 11.1.2. Глобальная томографическая модель мантии

Одним из основных источников знаний о строении мантии Земли остаются данные сейсмической томографии. В рамках настоящего проекта в базу геоданных ГЦ РАН были включены данные, полученные на основе глобальной томографической модели верхней мантии и переходной зоны (SL2013sv) [Schaeffer and Lebedev, 2013]. Данные

представляют собой значения вариации скорости поперечных волн (поляризованные в вертикальной плоскости) в процентах от стандартного (референтного) значения в каждом слое в диапазоне глубин 25–700 км с интервалом 25 км.

ГИС-слои, полученные на основе представленной модели SL2013sv, имеют пространственное разрешение 30'×30'. Исходя из указанного выше диапазона (25–700 км с интервалом 25 км) было сформировано 29 слоев данных в растровом формате. Растры были экспортированы в единый файл персональной базы геоданных (\*.gdb), который был добавлен в общую файловую базу данных ГИС. С помощью программного пакета ESRI ArcGIS слои были оформлены в виде цифровых карт и опубликованы как часть картографического веб-сервиса «Геофизика».

## **11.2. Интеграции алгоритмов анализа геоданных в среде ГИС**

В рамках проекта создана аналитическая подсистема ГИС, отвечающая за интерактивный доступ к каталогу алгоритмов обработки геоданных и их применение для анализа пространственных данных. Функционирование подсистемы осуществляется на сервере ГИС, и пользователю не требуется установка дополнительного специализированного программного обеспечения. Сервисы, опубликованные на сервере, могут использоваться в любом приложении или устройстве, которое может выполнить запрос к веб-сервису по протоколу HTTP. Пользователь взаимодействует с веб-клиентом, который включает в себя набор алгоритмов анализа данных, цифровую картографическую информацию и инструментарий управления слоями. Веб-клиент взаимодействует с веб-сервером с помощью JavaScript и REST API. Имеется возможность загружать актуальные данные с сервера геоданных ГЦ РАН.

Веб-сервер содержит данные о сервисах геообработки и о картографических сервисах. Входящие запросы веб-сервера для получения карт, алгоритмов, координат, выполнения заданий геообработки назначаются ГИС-серверу. ГИС-сервер выполняет отрисовку карты, поиск координат, запуск инструментов геообработки, возвращение результатов клиенту. С ГИС-сервером взаимодействие происходит по протоколу HTTP (рис. 11.2). Обработка данных выполняется компонентами контейнера серверных объектов и менеджера серверных объектов ГИС-сервера. Пользователь запрашивает выполнение задачи и предоставляет входные параметры. Сервер выполняет задачу и отправляет результирующие значения на сторону клиента. Клиент имеет в своем распоряжении данные с сервера ГЦ РАН и набор алгоритмов, хранящихся на сервере, которые к ним можно применить. После соответствующего выбора на стороне клиента формируется запрос в формате JSON, который передает информацию о запросе пользователя на сервер с помощью REST API. Создается задача геообработки, которой присваивается уникальный идентификатор. Слой в результирующем картографическом сервисе соответствует выходному набору геоданных из задачи геообработки.

ГИС-сервер комплекса создан на основе программного пакета ESRI ArcGIS for Server. Данный компонент предназначен для обмена географической информацией как локально в рамках организации, так и глобально через сеть Интернет. Через ГИС-сервер

осуществляется доступ к обширной базе геоданных, а также к опубликованным сервисам геообработки; взаимодействие с клиентом, выполняются ответы на его запросы, отсылаются результаты расчетов. Кроме того, здесь публикуются и тестируются с помощью встроенных инструментов все алгоритмы, которые в будущем планируется загружать в алгоритмическую базу.



**Рисунок 11.2 – Схема работы аналитической подсистемы**

Клиентское веб-приложение написано на языке JavaScript с использованием языка разметки HTML и языка описания внешнего вида CSS. В основе приложения лежит среда разработки Dojo Toolkit. Разработанное приложение визуализации имеет следующие возможности: подключение к серверу ГЦ РАН, загрузка актуальных данных по наукам о Земле при запуске приложения; просмотр, нанесение на карту слоев с данными; отправка заданий геообработки на сервер, получение результатов и добавление их на карту; смена базовой карты на любом этапе работы; возможность отправления сразу нескольких заданий. Веб-приложение также включает в себя интерфейс для актуализации базы геоданных.

В отличие от исполнения алгоритмов на локальном компьютере, созданная подсистема обладает следующими преимуществами: постоянно пополняемый набор алгоритмов; возможность выполнения нескольких алгоритмов последовательно на одних данных; минимальные требования к рабочему месту пользователя (все вычисления выполняются на сервере, пользователь получает только результаты); доступ к наиболее полной базе геоданных и результатов их обработки.

На данный момент в подсистему интегрированы следующие алгоритмы: «DPS» и его модификация, «Роден-2», «Монолит». Перечисленные алгоритмы являются частью

разрабатываемого в ГЦ РАН математического метода «Дискретный математический анализ» [Гвишиани и др., 2002а, 2002б, 2010; Агаян и Соловьев, 2004; Агаян и др., 2014].

### 11.3. Заключение

В 2015 г. в рамках реализации мероприятий Программы Отделения наук о Земле РАН № 7 «Интеллектуальный анализ геофизических данных, геоинформатика и математическая геофизика» велись работы по совершенствованию возможностей многодисциплинарной аналитической ГИС «Данные наук о Земле по территории России». Основные работы были направлены на расширение базы геоданных ГЦ РАН новыми данными о внутреннем строении Земли и расширение функционала самой ГИС путем интеграции в ее среду алгоритмов анализа геоданных средствами специализированной аналитической подсистемы.

### 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. Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р. Математические методы геоинформатики. I. О новом подходе к кластеризации // Кибернетика и системный анализ. 2002а. № 2. С. 104–122.
4. 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. № 2. Выпуск № 16. С. 109–125.
5. 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. 2002б. № 7. С. 13–28.
6. Bassin C., Laske G., Masters G. The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America // Eos Trans American Geophysical Union. 2000. 81(48). Fall Meet. Suppl., Abstract F897.
7. Burov E. B., Diament M. The effective elastic thickness of ( $T_e$ ) continental lithosphere. What does it really mean? // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100. P. 3895–3904.
8. Mooney W. D., Kaban M. K. The North American upper mantle: density, composition, and evolution // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. B12424. doi:10.1029/2010JB000866.
9. Schaeffer A. J., Lebedev S. Global shear-speed structure of the upper mantle and transition zone // Geophysical Journal International. 2013. Vol. 194. No. 1. P. 417–449.
10. Tesauro M., Kaban M. K., Cloetingh S. A. P. L. EuCRUST-07: A new reference model for the European crust // Geophys. Res., Lett. 2008. Vol. 35. L05313. doi:10.1029/2007GL032244.
11. Tesauro M., Kaban M. K., Cloetingh S. A. P. L. Global model for the lithospheric strength and effective elastic thickness // Tectonophysics. 2013. Vol. 602. P. 78–86.

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

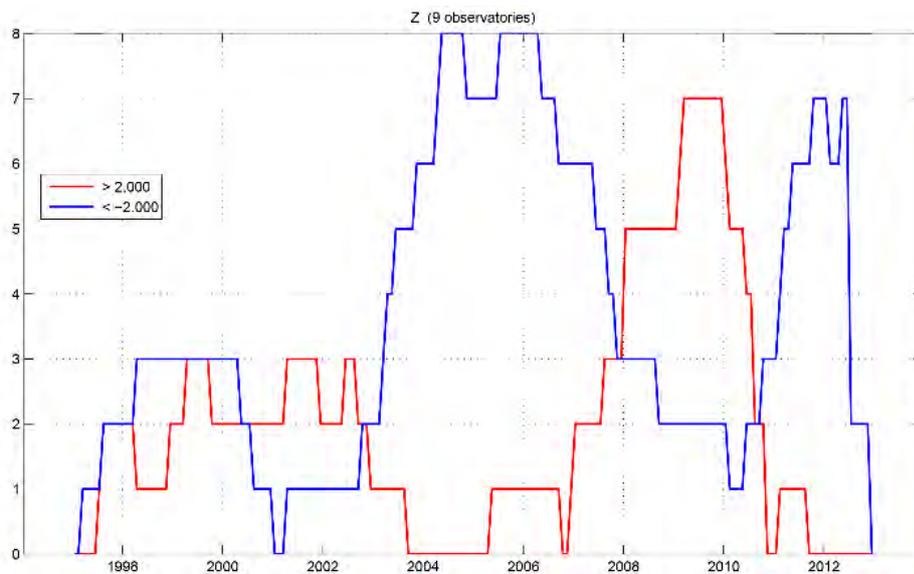
Номер гос. регистрации № 115082070009 (0145-2015-0006)

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

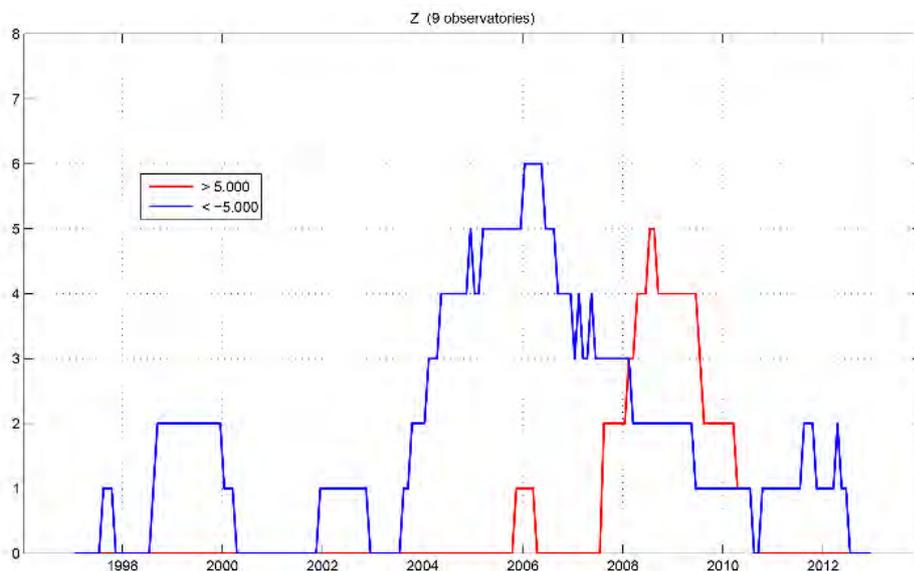
Ответственный исполнитель зам. директора по науке, д.ф.-м.н. Ан. А. Соловьев

Начиная с 2000 г. на вариации магнитного поля Земли (МПЗ), источником которых служат процессы во внешнем ядре Земли, оказали воздействие несколько всплесков векового ускорения (ВУ), которые привели к геомагнитным джеркам на поверхности Земли. С использованием моделей ГМПЗ, построенных за последнее время на базе спутниковых данных DMSP, Ørsted и Swarm [Friis-Christensen et al., 2006], а также данных наземных обсерваторий, недавно был обнаружен новый всплеск 2012 года [Chulliat et al., 2015]. Последние исследования [Chulliat et al., 2010; Chulliat, Maus, 2014; Chulliat et al., 2015] показывают, что по крайней мере некоторые геомагнитные джерки, наблюдаемые на поверхности Земли, являются результатом начальной или конечной фаз всплесков ВУ на границе ядра и мантии. Данная теория позволяет соотносить джерки, наблюдаемые в фиксированных точках на поверхности Земли, с крупными всплесками ВУ на поверхности ядра за эпохи между джерками. В рамках настоящего исследования были продолжены работы по развитию альтернативного метода распознавания всплесков ВУ с использованием только обсерваторских данных. По сравнению с предыдущим этапом исследований исходный массив данных был расширен с временного интервала 1997–2012 гг. до 1997–2013 гг. Как и на прошлом этапе, рассматривались данные обсерваторий отдельно в Атлантическом и Южно-азиатском регионах. Согласно алгоритму, изложенному на предыдущем этапе проекта, были построены характеристические функции по вертикальной компоненте ( $Z$ ) в случае Атлантического региона и по восточной компоненте ( $Y$ ) магнитного поля для Южно-азиатского региона. На рис. 12.1 приведены характеристические функции, рассчитанные для Атлантического региона, на рис. 12.2 – характеристические функции, рассчитанные для Южно-азиатского региона.

Анализ рис. 12.1 и 12.2 показывает, что последний зафиксированный всплеск ВУ за эпоху 2012.5 был успешно распознан предложенным алгоритмом. Соответствующему моменту времени соответствуют локальные максимумы характеристических функций в обоих регионах. Важно отметить, что локальные максимумы наблюдаются при всех пороговых значениях  $A$ , что свидетельствует об устойчивости и надежности результатов распознавания. Данный результат полностью согласуется с результатами исследования, полученными при помощи высокоточных моделей ГМПЗ, построенных с использованием спутниковых данных [Chulliat et al., 2015].

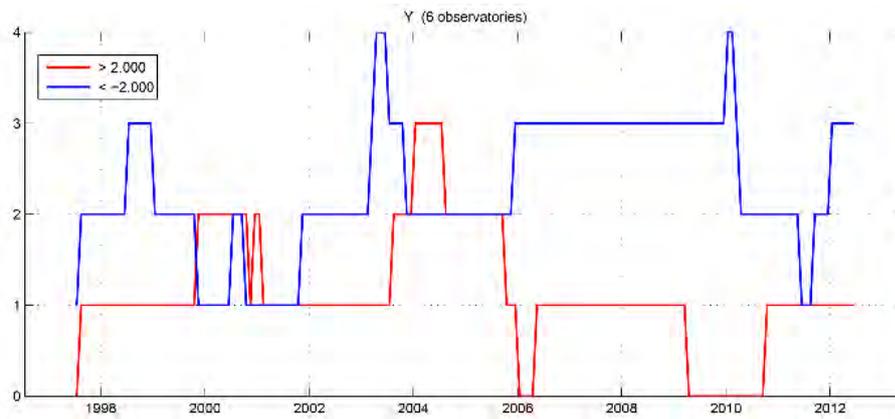


(a)

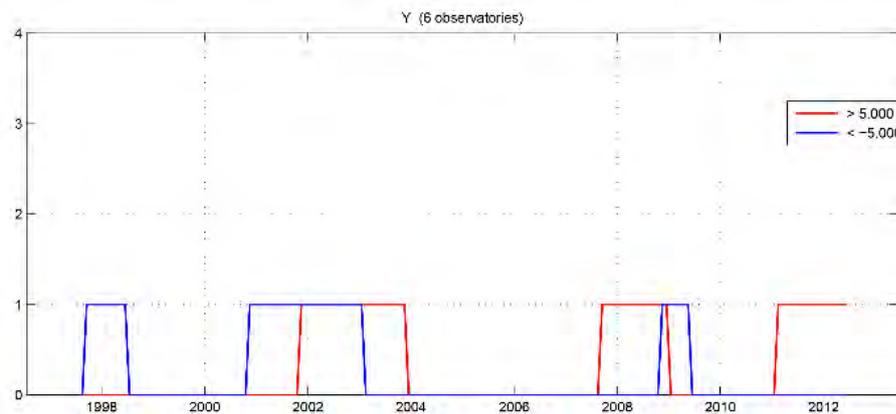


(б)

**Рисунок 12.1 – Графики характеристической функции по вертикальной компоненте ( $Z$ ), зарегистрированной на обсерваториях в Атлантическом регионе. На рисунке приведены примеры характеристических функций, полученных при пороговых значениях  $A$  (по модулю)  $2 \text{ нТл/год}^2$  (а) и  $5 \text{ нТл/год}^2$  (б). На графиках синим цветом обозначено количество обсерваторий за каждый месяц, для которых  $d^2Z/dt^2 < -A$ , красным – для которых  $d^2Z/dt^2 > A$**



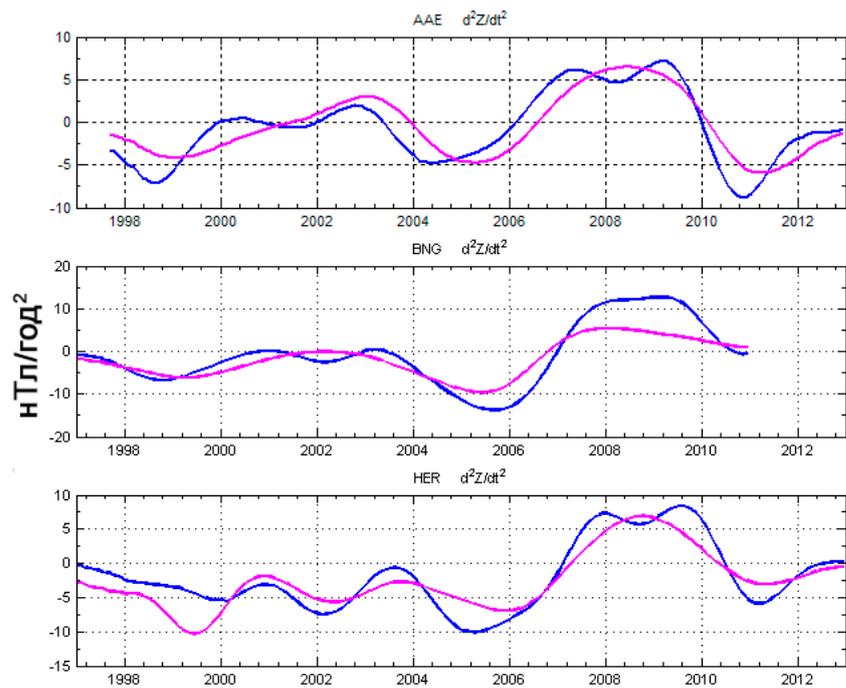
(а)



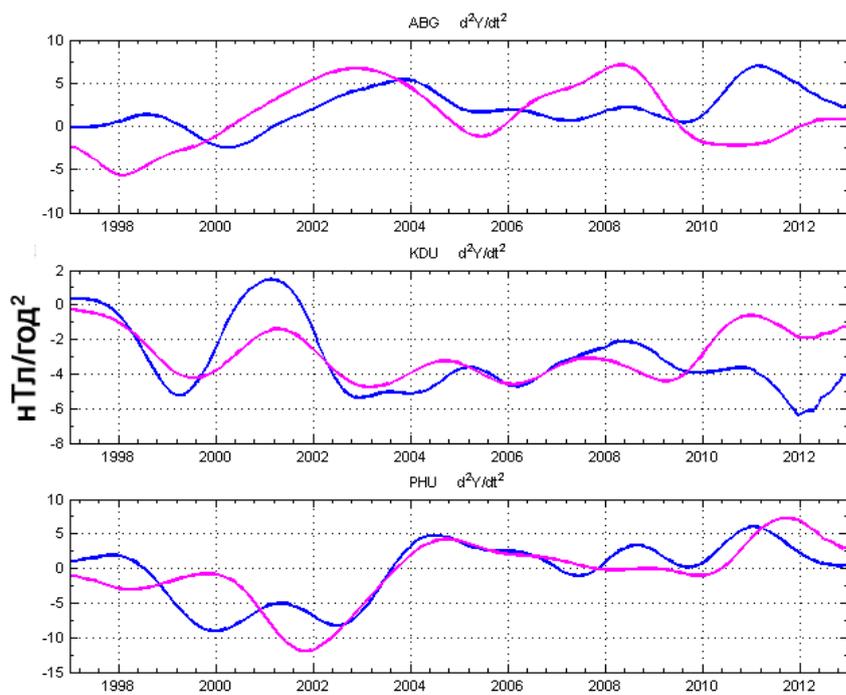
(б)

**Рисунок 12.2 – Графики характеристической функции по восточной компоненте ( $Y$ ), зарегистрированной на обсерваториях в Южно-азиатском регионе с пороговыми значениями  $2 \text{ нТл/год}^2$  (а) и  $5 \text{ нТл/год}^2$  (б). Обозначения аналогичны рис. 12.1**

Кроме того, в результате применения алгоритма был распознан всплеск ВУ в районе 2002.5 как в Атлантическом, так и в Южно-азиатском регионах (локальные максимумы на рис. 12.1 и 12.2) при всех пороговых значениях  $A$ . Наличие данного всплеска хорошо согласуется с теорией чередования всплесков и геомагнитных джерков [Chulliat, Maus, 2014], т.к. предвещает джерк 2003 г. В Атлантическом регионе наиболее сильно всплеск был проявлен на данных обсерватории HER (рис. 12.3а), а в Южно-азиатском – на данных обсерваторий AVG, KDU и PHU (рис. 12.3б). На рис. 12.3 также представлены кривые ВУ, построенные по модели Chaos-5 [Finlay et al., 2015] на поверхности Земли в точках установки соответствующих обсерваторий.



(а)



(б)

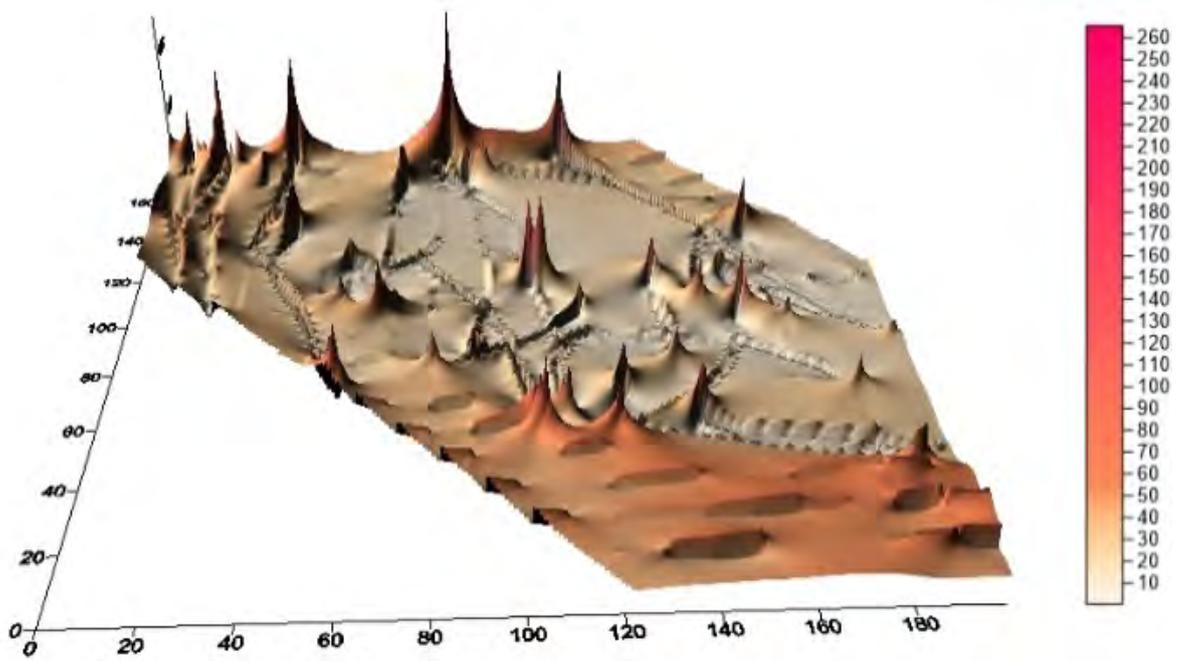
**Рисунок 12.3 – графики ВУ ( $d^2Z/\text{год}^2$ ) по значениям вертикальной компоненты ( $Z$ ), зарегистрированным на обсерваториях ААЕ, BNG и HER с 1997.0 по 2013.0 (а); графики ВУ ( $d^2Y/\text{год}^2$ ) по значениям восточной компоненты ( $Y$ ), зарегистрированным на обсерваториях ABG, KDU и PHU с 1997.0 по 2013.0 (б). Фиолетовая кривая получена методом гравитационного сглаживания, синяя – построена по модели Chaos-5 с учетом полей ядра и литосферы [Finlay et al., 2015]**

Другой, менее интенсивный, но также стабильный при разных значениях  $A$  всплеск ВУ был распознан в районе 1999.5 в Атлантическом секторе (локальные максимумы на рис. 12.1а и 12.1б). К обсерваториям, на которых всплеск имел максимальную амплитуду, относятся ААЕ, BNG и HER, локализованные в восточной части Африки. На рис. 12.3а приведены графики ВУ, построенные по данным обсерваториям. Ранее в литературе данный всплеск особо не рассматривался, прежде всего, из-за отсутствия спутниковых измерений для построения адекватных моделей ГМПЗ. Однако в некоторых работах [De Michelis, Tozzi, 2005; Mandeia et al., 2000] обсуждался вопрос геомагнитного джерка, имевшего место в районе 1998–1999 гг. Следуя теории появления джерков между двумя всплесками ВУ, стоит предположить наличие одного всплеска в районе 1996 г., а другого – в районе 1999 г. Наличие второго всплеска подтверждается результатами настоящего исследования. Данный результат, полученный впервые, дает серьезное основание полагать, что предложенный подход применим для изучения всплесков ВУ за прошедшие эпохи, для которых отсутствуют географически-однородные спутниковые наблюдения МПЗ.

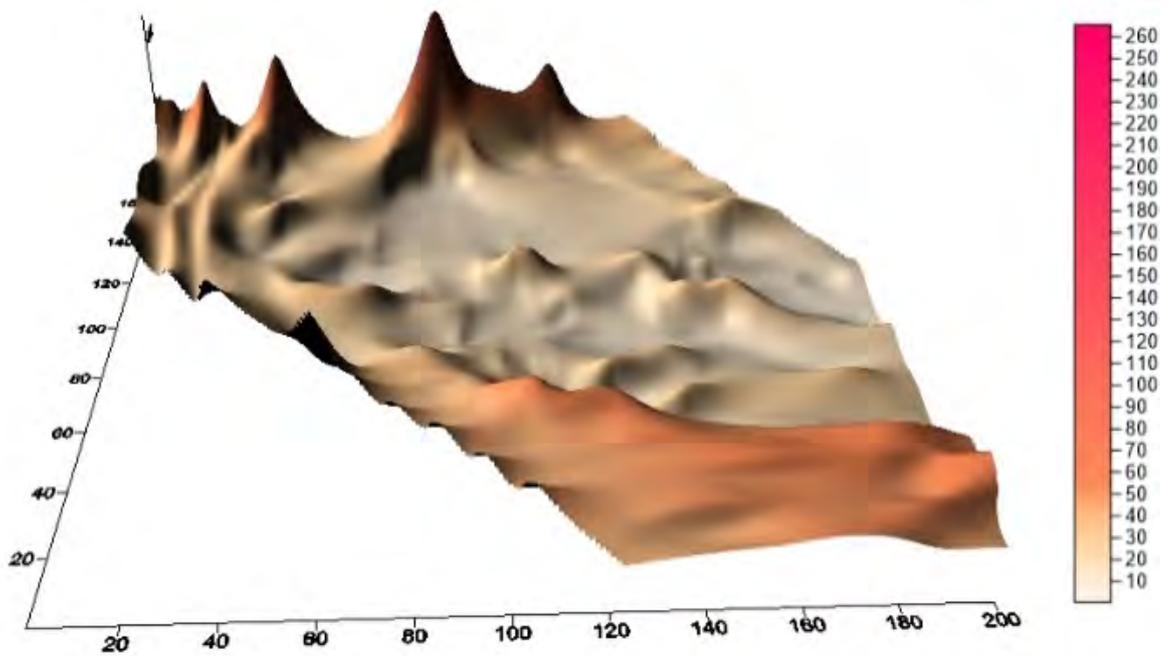
С появлением высокоточных спутниковых наблюдений магнитного поля, равномерно покрывающих поверхность Земли, появилась необходимость анализа соответствующих двумерных рядов с целью распознавания «активных» участков, фоновых фрагментов и оценки динамических параметров поля. В последнее время наиболее важные результаты в рамках развития теории ДМА связаны с новым понятием регрессионной производной для функций, определенных на конечных множествах. К числу таких функций относятся физические поля, измеренные в общем случае на нерегулярном множестве узлов на плоскости. В этом смысле для «двумерных» дискретных функций в рамках настоящего проекта на базе регрессионных производных строятся сглаживания и анализируются их отклонения от исходной функции, что позволяет находить на последних высокочастотные и значительные по амплитуде фрагменты. Пример исходной двумерной функции приведен на рис. 12.4а. Вид построенного сглаживания  $f$ , основанного на регрессионной касательной плоскости, представлен на рис. 12.4б.

Поиск аномалий, представляющих собой высокочастотные и высокоамплитудные фрагменты  $f$ , осуществляется на основе анализа разности  $|f - S_m f|$ . Анализ разности основан на апробированном методе ДМА [Гвишиани и др., 2008] и представлен на рис. 12.5.

Базе данных обсерватории «Климовская» [Geomagnetic data recorded at Geomagnetic Observatory Klimovskaya (IAGA code: KLI), 2015], развитие которой осуществлялось на предыдущих этапах проекта, и отдельно массиву оперативных данных [Soloviev et al., 2015] были присвоены цифровые идентификаторы объектов DOI (Digital Object Identifier). Таким образом, данные расцениваются как полноценные результаты исследований, которые, будучи использованы при создании научного продукта, допускают цитирование наравне с другими научно-исследовательскими источниками (статьи, книги и т. п.) [Лукьянова, 2013].

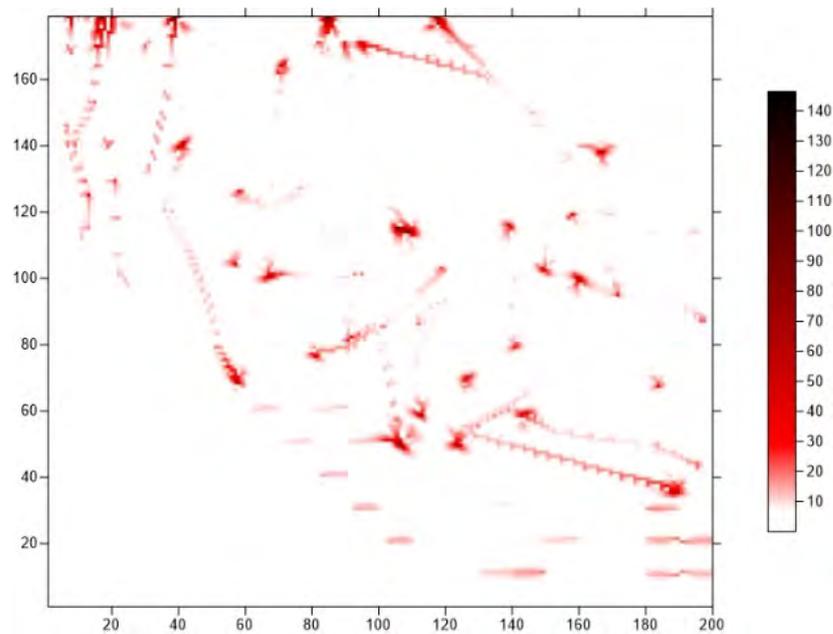


(a)



(б)

Рисунок 12.4 (а) – исходная функция  $f$ , в данном случае – интенсивность напряжений в районе Нижнеканского гранитоидного массива; (б) – регрессионное сглаживание  $Smf$  исходной функции  $f$ . Значения в узлах сетки приведены в виде шкалы справа



**Рисунок 12.5 – Распознанные высокочастотные и высокоамплитудные фрагменты на исходном двумерном ряде**

### Список литературы

1. **Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р.,** Злотники Ж., Боннин Ж. Математические методы геоинформатики III. Нечеткие сравнения и распознавание аномалий на временных рядах // Кибернетика и системный анализ. 2008. Т.44. № 3. С. 3–18
2. **Лукьянова Р. Ю.** Включение обсерваторских данных в систему цитирования DOI // Вестник ОНЗ РАН. Т. 5. NZ9001. DOI:10.2205/2013NZ000120. 2013.
3. Chulliat, A., P. Alken, and S. Maus (2015), Fast equatorial waves propagating at the top of the Earth's core // *Geophys. Res. Lett.*, 42, 3321–3329. DOI:10.1002/2015GL064067.
4. Chulliat, A., and S. Maus (2014), Geomagnetic secular acceleration, jerks, and a localized standing wave at the core surface from 2000 to 2010 // *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 1531–1543, DOI:10.1002/2013JB010604.
5. Chulliat, A., E. Thébaud, and G. Hulot (2010), Core field acceleration pulse as a common cause of the 2003 and 2007 geomagnetic jerks // *Geophys. Res. Lett.*, 37, L07301, DOI:10.1029/2009GL042019.
6. Geomagnetic data recorded at Geomagnetic Observatory Klimovskaya (IAGA code: KLI). Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2015. <http://doi.org/10.2205/kli2011>.
7. P. De Michelis, R. Tozzi (2005), A Local Intermittency Measure (LIM) approach to the detection of geomagnetic jerks // *Earth and Planetary Science Letters*, 235(1–2), P. 261–272.
8. Finlay, C. C., Olsen, N. and Toffner-Clausen, L. (2015) DTU candidate field models for IGRF-12 and the CHAOS-5 geomagnetic field model // *Earth Planets and Space*, 67, 114, DOI:10.1186/s40623-015-0274-3.
9. Friis-Christensen E., Lühr H., Hulot G. Swarm: A constellation to study the Earth's magnetic field // *Earth, Planets and Space*. V. 58. P. 351–358. 2006.
10. M. Mandea, E. Bellanger, J.–L. Le Mouél (2000), A geomagnetic jerk for the end of the 20th century? // *Earth and Planetary Science Letters*, 183 (2000), P. 369–373.
11. **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 Klimovskaya (IAGA code: KLI). Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2015. DOI:10.2205/kli2011min.

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

Номер гос. регистрации № 115082070005 (0145-2015-0005)

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

Этап 2015 г. Анализ методов распознаваний предвестников геомагнитных бурь; разработка системы магнитограмм с Sudden commencement (SC) и геомагнитными бурями; постановка задачи распознавания SC на основе частотно-временных распределений.

1. Анализ методов распознаваний предвестников геомагнитных бурь (ГМБ) реализуется в интересах постановки основной задачи в рамках этапа 2015 г.

1.1. Предсказание ГМБ может осуществляться путём анализа радиоизлучения Солнца. Возникновение ГМБ связывается с солнечными корональными выбросами, которые превращаются в поток плазмы – солнечный ветер. Выбросы формируют в солнечном ветре ударные волны; при достаточной энергии волн в плазме происходит ускорение частиц, которые, в свою очередь, создают радиоизлучение [1–3].

Предвестники ГМБ могут основываться на оценках функций частотно-временных распределений (ЧВР) нестационарного радиоизлучения (НСР) Солнца. С этой целью должна быть вычислена двумерная функция ЧВР оценок НСР Солнца, сформированы соответствующая двумерная референтная ЧВР-функция и алгоритм сравнения функций оценок ЧВР-НСР и референтной ЧВР-функции. В простейшем случае предполагается вычисление оценок НСР на некоторых малых временных и частотных интервалах, назначение пороговых значений величин спектров для каждого из временных и частотных интервалов, проведение процедур сравнений и принятия решений. В качестве предвестников ГМБ в данном случае могут быть приняты результаты работы алгоритма сравнения.

Метод распознавания предвестников ГМБ, основанных на ЧВР для НСР, потенциально позволяет реализовать предсказание ГМБ с прогнозным временем 24–48 часов. Однако, достоверных сведений об эффективной реализации данного метода нет.

1.2. Предсказание ГМБ на основе анализа наблюдений параметров солнечного ветра (ПСВ) может достигаться с помощью измерительных систем космических аппаратов, размещённых в передней точке Лагранжа – на расстоянии  $\approx 1.5$  млн км от Земли на линии Солнце–Земля. В настоящее время в данной точке находится американский космический аппарат ACE, общая информация о котором имеется в [4, 5].

ПСВ, наблюдаемые с помощью многоканальной измерительной системы ACE, включают оценки напряжённости магнитного поля, скорости частиц космической плазмы, ее плотности и температуры. Перечисленные наблюдения от ACE являются существенно зашумлёнными. Когда поток плазмы, связанный с выбросом корональной массы, подходит к ACE, перечисленные параметры претерпевают скачкообразные изменения.

Предвестники ГМБ, основанные на оценках наблюдений ПСВ, формируются путем вычисления функции оценок ПСВ, задания соответствующей системы порогов и алгоритма сравнения функций оценок ПСВ и системы порогов.

Метод распознавания предвестников ГМБ, основанный на анализе космических наблюдений ПСВ в точке Лагранжа, позволяет достаточно точно (с вероятностью 95%) реализовать предсказание ГМБ с прогнозным временем порядка 0.5–1 часа.

1.3. Предсказание ГМБ на основе анализа оценок вариаций потоков космического излучения с помощью мюонных детекторов (МД) стоит на повестке дня. Космическое излучение отклоняется магнитными полями, которые связаны с корональными выбросами солнечной плазмы. Из-за этого поток космических лучей (главным образом, энергичных протонов) уменьшается в направлении выброса солнечной плазмы, приближающегося к Земле. Наблюдается глобальное уменьшение интенсивности мюонного излучения, генерируемого в верхних слоях атмосферы – форбуш-эффект, предшествующий возмущению земной магнитосферы [6]. Рассмотрение уменьшения интенсивности мюонного излучения, которое в определённой степени может иметь скачкообразный характер, даёт возможность заблаговременно прогнозировать возмущения в магнитосфере Земли, вызванные вспышками на Солнце или изменениями магнитного поля в гелиосфере, так как поток космических лучей достигает Земли раньше, чем корональные выбросы плазмы, движущиеся в межпланетном пространстве.

Для сканирования небесной полусферы используются широкоапертурные мюонные детекторы, которые позволяют восстанавливать треки мюонов с высокой угловой и пространственной точностью. Такие детекторы не только измеряют интенсивность мюонного излучения на поверхности Земли, но и регистрируют частицы одновременно с различных направлений небесной полусферы в годоскопическом режиме.

Предвестники ГМБ могут быть основаны на оценках наблюдений МД. Предполагается, что вычисляется набор функций оценок наблюдений МД в зависимости от сферических координат. В случае корональных выбросов в данных МД наблюдаются скачки их интенсивности.

Метод распознавания предвестников ГМБ, основанных на анализе данных МД, позволяет реализовать предсказание ГМБ с прогнозным временем 24–48 часов. Вполне возможна эффективная аппаратная и программная реализация данного метода [7].

1.4. Предсказание ГМБ может быть реализовано на основе прогноза геомагнитных индексов и математической технологии нейронных сетей [8, 9].

Нейронные сети (НС) используются в качестве метода, альтернативного традиционным методам для нелинейного прогноза временных рядов. Используются рекуррентные НС, основанные на нелинейной памяти для хранения информации об изменении параметров во времени. При прогнозировании геомагнитных индексов в качестве входных переменных для НС обычно используются значения скоростей и плотности солнечного ветра, а также значения Vz-компоненты магнитного поля. Для улучшения прогноза всех фаз геомагнитной бури использовались значения параметров солнечного ветра в течение 6–12 часов до начала геомагнитной бури.

Метод распознавания предвестников ГМБ, основанный на анализе геомагнитных индексов и нейросетевой технологии, несомненно, является перспективным. Этот метод может обеспечить предсказание ГМБ с прогнозным временем порядка 0,5–1 час.

1.5. Предсказание ГМБ на основе вычисления первых производных сигналов Sudden Commencement (SC) геомагнитного поля выглядит вполне естественным подходом к решению поставленной задачи. Указанный подход основан на использовании особенностей морфологии SC, представляющих собой короткие импульсные или скачкообразные функции, имеющие, как правило, передние и задние фронты со значительной крутизной, которым соответствуют большие значения первых производных.

Предвестники ГМБ, основанные на вычислении производных, формируются с использованием процедур двухэтапной фильтрации. Положим, что  $H_{1p}(Ti)$ ,  $H_{2p}(Ti)$ ,  $H_{3p}(Ti)$ ,  $H_{0p}(Ti)$  – компоненты и модуль вектора напряжённости геомагнитного поля для некоторого временного интервала с SC,  $i = 0, \dots, N - 1$ , полученные от системы магнитных обсерваторий, где  $p = 1, \dots, P_0$  – номер магнитной обсерватории. Оценка производной  $\dot{H}_{rp}^\circ(Ti)$  для вектора напряжённости геомагнитного поля,  $r = 0, 1, \dots, 3$  на первом этапе фильтрации может быть представлена на основе дифференцирующего фильтра скользящего среднего, где  $a_s$  – весовые коэффициенты,  $i = k, \dots, N - 1$

$$\dot{H}_{rp}^\circ(Ti) = \sum_{s=0}^k a_s H_{rp}(T(i-s)).$$

В простейшем частном случае дискретные производные для сигналов геомагнитного поля могут быть представлены в виде разностей

$$\dot{H}_{rp}^\circ(Ti) = H_{rp}(Ti) - H_{rp}(T(i-1)), \quad i = 1, \dots, N - 1.$$

Для второго этапа фильтрации вводятся обобщённые производные  $\dot{H}^\circ(Ti)$ , которые могут быть представлены в виде следующей суммы

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

Очевидно, что оценки обобщённых производных для временных точек, соответствующих SC, будут суммироваться и накапливаться, оценки для остальных точек будут суммироваться и по своим величинам будут существенно меньше, чем накопленные оценки. С учётом подходящей процедуры принятия решений накопленные оценки могут обеспечить решение задачи предсказания и служить предвестниками ГМБ.

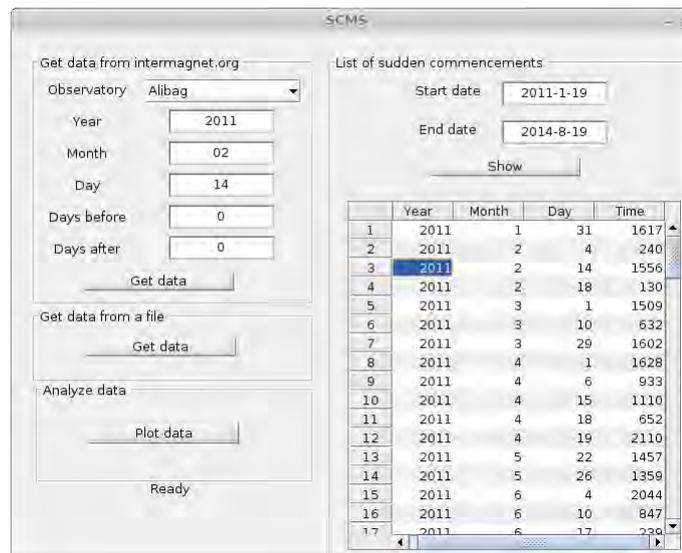
1.6. Предсказание ГМБ на основе системы вейвлет-разложений (СВР) сигналов SC геомагнитного поля представлено в достаточном количестве публикаций, в которых описаны варианты использования вейвлет-разложений для автоматического распознавания SC [10, 11]. Распознавание предвестников ГМБ на основе СВР существенным образом зависит от удачного выбора вида материнских вейвлетов.

Метод распознавания предвестников ГМБ, основанных на ПСВ и СВР, позволяет реализовать предсказание ГМБ с прогнозным временем порядка 6–12 часов.

2. Разработка системы магнитограмм с SC и геомагнитными бурями производится Matlab-программным комплексом SCDA (Sudden Commencement Data Analyzer). Формирование системы магнитограмм с SC и возможными последующими магнитными бурями основывается на архиве системы Интермагнет (<http://www.intermagnet.org>) и архиве дат SC, взятом из Международного центра данных по солнечно-земной физике (<http://www.wdcb.ru/stp/data/sudden.com>).

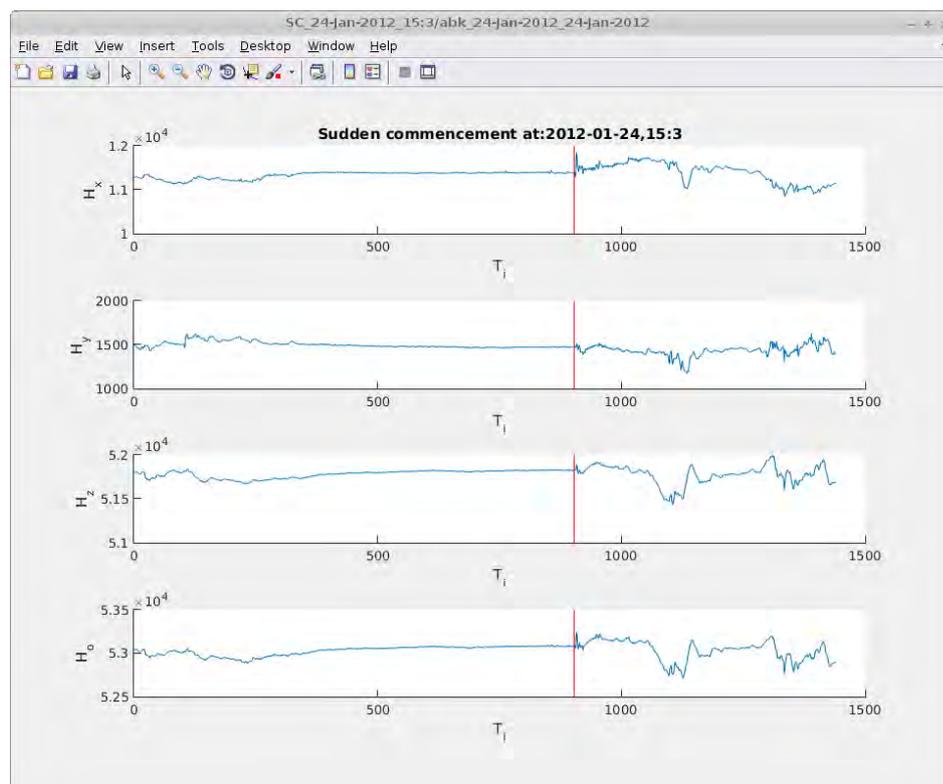
Комплекс SCDA обеспечивает формирование системы магнитограмм в виде файлов с записями компонент и модуля вектора напряжённости геомагнитного поля  $H_x(Ti)$ ,  $H_y(Ti)$ ,  $H_z(Ti)$  и  $H_0(Ti)$ , для точек  $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$  от заданной последовательности магнитных обсерваторий в формате Matlab; во временном интервале с указанными точками располагаются сигналы SC и возможные магнитные бури. В функции SCDA входит осуществление визуализации компонент и модуля и обеспечение возможности последующей цифровой обработки компонент и модуля вектора напряжённости геомагнитного поля в комплексе Matlab. Для функционирования комплекса SCDA предполагается задание дат SC из архива дат SC, сформированного в виде таблицы и кода обсерватории из таблицы названий магнитных обсерваторий, входящих в Интермагнет. С этой целью строки таблицы дат нумеруются, начиная с первой записи, соответствующей 1932 г. По номеру строки извлекается информация, в которой содержатся год, месяц, число, час, минута зафиксированного SC; по этой информации назначается начальное и конечное время анализируемого сигнала с SC. Далее задаются название обсерватории, шаг дискретности наблюдений (1 мин. или 1 с) и начальное-конечное время наблюдения магнитограммы, соотнесённое соответствующим образом с информацией о SC.

На рис. 13.1 изображён входной интерфейс комплекса SCDA с соответствующими окнами ввода информации и управляющими кнопками. Выбрано время SC 2011.01.19 16 ч. 17 мин., назначена магнитная обсерватория Alibag, назначено начальное и конечное время для анализа – days before – 0, days after – 0, таким образом, длительность интервала времени рассмотрения составляет 24 часа (1440 точек для минутной дискретизации), после чего данные загружаются в память (Load data) и, в последующем, извлекаются (Get data).



**Рисунок 13.1 – Пример входного интерфейса комплекса SCDA**

На рис. 13.2 помещено изображение выходного интерфейса с окнами, в которых содержатся результаты визуализации компонент и модуля вектора напряжённости геомагнитного поля с курсором, который соответствует времени возникновения SC.



**Рисунок 13.2 – Пример выходного интерфейса комплекса SCDA**

3. Постановка задачи распознавания SC на основе частотно-временных распределений SC базируется на вычислении скользящих частотно-временных распределений (ЧВР) на полигармонических моделях (ПГМ) для сигналов геомагнитного поля и реализации их сравнений с референтными ЧВР.

Недостатки традиционных функций ЧВР на основе скользящих дискретных преобразований Фурье (ДПФ) – малые разрешающие способности по времени и частоте. Предлагаемые ПГМ, применяемые для построения ЧВР, позволяют улучшить разрешение по времени и частоте за счёт реализации возможно меньших локальных временных интервалов и оптимизации расположения частот для ПГМ.

3.1. Построение диаграмм ЧВР для локальных (малых) временных интервалов может основываться на аппроксимации наблюдений с помощью ПГМ.

Рассматриваемые здесь диаграммы ЧВР на ПГМ с оптимизацией их частотных и амплитудных параметров [12, 13] обладают рядом преимуществ, которые отсутствуют у традиционных вариантов ЧВР. Так, для предлагаемых ЧВР, по сравнению с ЧВР, основанным на скользящих дискретных преобразованиях Фурье (ДПФ), достигается улучшение разрешающей способности по частоте благодаря оптимизации частотных параметров для ПГМ. Кроме того, для рассматриваемых ЧВР отсутствует появление ложных спектрально-временных оценок, тогда как для других ЧВР, например, Вигнера [14], имеет место, в некоторых случаях, их появление. По сравнению с ЧВР, в котором используется алгоритм Прони [15], рассматриваемые ЧВР не накладывает ограничений, связанных с числом наблюдений и числом частотных составляющих в ПГМ, что устраняет определённые трудности, возникающие при интерпретации. Отметим, что ПГМ без оптимизации [16, 17, 18] применяются достаточно широко для различных прикладных задач.

Алгоритм построения локальных ПГМ базируется на стандартных составляющих: назначении вида модели, наблюдений, функционала и реализации задачи аппроксимации. Будем полагать, что ПГМ  $H_M(a, b, \omega, Ti)$ , предназначенная для аппроксимации наблюдений компонент вектора напряжённости геомагнитного поля  $H(Ti)$  для события SC на некотором локальном временном интервале представляется в следующем виде

$$H_M(a, b, \omega, Ti) = \sum_{i=1}^L (a_i \cos \omega_i Ti + b_i \sin \omega_i Ti), \quad i = 0, 1, \dots, N-1,$$

где  $a, b$  – векторы линейных параметров,  $\omega^T = (\omega_1, \dots, \omega_L)$  – вектор частотных параметров размерности  $(L, 1)$ ,  $\omega \in \Omega_0^L$ ,  $\Omega_0^L$  – допустимое множество частотных векторов. Пусть вектор наблюдений имеет вид

$$H^T = (H(T \cdot 0), H(T \cdot 1), \dots, H(T(N-1))).$$

Формируется аппроксимационный функционал

$$W(a, b, \omega, H) = \sum_{i=0}^{N-1} (H(Ti) - H_M(a, b, \omega, Ti))^2.$$

Оценки параметров для ПГМ вычисляются по результатам решения задачи минимизации, которая решается в два этапа

$$(a^\circ, b^\circ, \omega^\circ) = \arg \left\{ \min_{a, b, \omega \in \Omega_0^L} W(a, b, \omega, H) \right\}.$$

На первом этапе аппроксимации для  $W(a, b, \omega, H)$  фиксируются нелинейные частотные параметры  $\omega = const$  и находятся частично оптимальные линейные параметры  $a^\circ(\omega, H)$ ,  $b^\circ(\omega, H)$ :

$$(a^\circ(\omega, H), b^\circ(\omega, H)) = \arg \left\{ \min_{a, b, \omega = const} W(a, b, \omega, H) \right\}.$$

С учетом  $a^\circ(\omega, H)$ ,  $b^\circ(\omega, H)$  формируется функционал частичной остаточной суммы, зависящий от  $\omega$ :  $W_0(\omega, H) = W(a^\circ(\omega), b^\circ(\omega), \omega, H)$ . На втором этапе аппроксимации  $W_0(\omega, H)$  оптимизируется по  $\omega \in \Omega_0^L$ . Находятся оценки частотных параметров  $\omega^\circ$  и, с использованием  $\omega^\circ$ , вычисляются оценки амплитудных параметров  $a^\circ$  и  $b^\circ$ :

$$\omega^\circ = \omega^\circ(H) = \arg \left\{ \min_{\omega \in \Omega_0^L} W_0(\omega, H) \right\}, a^\circ = a^\circ(\omega^\circ, H), b^\circ = b^\circ(\omega^\circ, H).$$

Ввиду того, что функционал  $W_0(\omega, H)$  зависит от многих переменных и является многоэкстремальным [12], его минимизацию целесообразно производить с помощью поисковой процедуры нулевого порядка. Для получения оценок амплитудных параметров  $\beta^\circ$  реализуется перебор векторов поисковых частот. Пусть значения координат векторов поисковых частот выбираются на сетке дискретных значений  $\omega_k$  в диапазоне  $(\omega_{\min}, \omega_{\max})$ :

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

где  $k_f$  – число дискретных частот на сетке,  $\Delta\omega$  – шаг дискретности. Частоты  $\omega_{k_1}, \omega_{k_2}, \dots, \omega_{k_L}$  назначаются из заданного набора дискретных значений  $\omega_k$ ,  $k = 1, \dots, k_f$ . Очевидно, индексы  $k_1, k_2, \dots, k_L$  для этих частот с учётом неравенств должны удовлетворять системе из  $L$  неравенств:

$$1 \leq k_1 \leq k_f - L + 1, k_1 + 1 \leq k_2 \leq k_f - L + 2, \dots, k_{L-2} + 1 \leq k_{L-1} \leq k_f - 1, k_{L-1} + 1 \leq k_L \leq k_f.$$

Введённые индексы удобно объединить в векторы:  $k^T = (k_1, k_2, \dots, k_L)$ . В общем случае перебор векторов индексов решается путем применения комбинаторных алгоритмов [19].

Метод задания поисковых частот основывается на установлении для каждого вектора индексов  $k^s$  соответствия вектору поисковых частот  $\omega^s$ ,  $s$  – номер вектора. Координаты  $\omega_{k_1}^s, \omega_{k_2}^s, \dots, \omega_{k_L}^s$  для этого вектора частот  $\omega^s$  вычисляются по формулам:

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

Отыскание оптимальных частотных и амплитудных параметров ПГМ на локальном интервале сводится к последовательным вычислениям  $\omega^s$  для  $s = 1, \dots, s_f$ :

$$s^\circ = \arg \left\{ \min_{s=1, \dots, s_f} W_0(\omega^s, Y) \right\}, \omega^\circ = \omega^{s^\circ}, \beta^\circ = \beta^\circ(\omega^{s^\circ}).$$

3.2. Построение ПГМ на локальном временном интервале из  $N$  точек сводится к задаче локальной аппроксимации и вычислению частотных и амплитудных параметров:

$$(f_1^\circ, f_2^\circ, \dots, f_L^\circ, A_1^\circ, A_2^\circ, \dots, A_L^\circ), f_l^\circ = \omega_l^\circ / 2\pi, A_l^\circ = (a_l^{\circ 2} + b_l^{\circ 2})^{1/2}, l = 1, 2, \dots, L.$$

Сформированной сетке частот  $\omega_k, k = 1, \dots, k_f$  ставятся в соответствие амплитуды:

$$A_k, k = 1, \dots, k_f, A_k = (a_{k_l}^{\circ 2} + b_{k_l}^{\circ 2})^{1/2}, l = 1, 2, \dots, L,$$

где  $k = k_l^\circ$  – координаты оптимального вектора индексов, для остальных индексов  $k \neq k_l^\circ$  будем иметь  $A_k = 0$ . Результатом построения ПГМ на локальном интервале оказывается массив амплитуд  $A_k, k = 1, \dots, k_f$ , где индекс  $k$  определяет частотный параметр.

Для точек  $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$  строятся последовательности скользящих локальных интервалов по  $N$  точек,  $N_{2j}, N_{1j}$  – граничные точки скользящих локальных интервалов,  $j$  – номер локального интервала,  $j = 1, \dots, m$ . Например,  $N_{1j} = N_d(j-1), N_{2j} = N_{1j} + N - 1, j = 1, \dots, m, N_d$  – шаг скольжения. Решаются задачи локальной аппроксимации – нахождения ПГМ для скользящих интервалов и вычисления двумерных массивов оптимальных частотных и соответствующих им амплитудных параметров:

$$(f_{1j}^\circ, f_{2j}^\circ, \dots, f_{Lj}^\circ, A_{1j}^\circ, A_{2j}^\circ, \dots, A_{Lj}^\circ), f_{lj}^\circ = \omega_{lj}^\circ / 2\pi, A_{lj}^\circ = (a_{lj}^{\circ 2} + b_{lj}^{\circ 2})^{1/2}, l = 1, 2, \dots, L, j = 1, \dots, m.$$

Результатом построения ПГМ на исходном временном интервале будет двумерный массив амплитуд  $A_{k,j}, k = 1, \dots, k_f, j = 1, \dots, m$ , где индекс  $k$  определяет частотный параметр.

3.3. На основе двумерного массива амплитуд из п. 3.2 вычисляются локальные двумерные скользящие функции частотно-временных распределений  $P_j(\omega_k, Ti)$

$$P_j(\omega_k, Ti) = A_{k,j}^2, 1 \leq k \leq k_f, N_{1j} \leq i \leq N_{2j},$$

$$P_j(\omega_k, Ti) = 0, 0 \leq i < N_{1j}, N_{2j} < i \leq N_f - 1, j = 1, \dots, m,$$

для частотно-временного прямоугольника, которые имеют вполне отчётливый физический смысл. Формируется референтная функция ЧВР для спокойных состояний геомагнитного поля  $\bar{P}_j(\omega_k, Ti)$ , которая является, в определённом смысле, пороговой. Принятие решений о распознавании SC-предвестника осуществляется по результатам сравнения референтной и локальных функций ЧВР.

Процедура принятия решения о распознавании предвестника SC ГМБ на  $j$ -м локальном прямоугольнике  $1 \leq k \leq k_f, N_{1j} \leq i \leq N_{2j}$  состоит в проверке выполнения  $Nk_f$  неравенств или их части

$$P_j(\omega_k, Ti) > \bar{P}_j(\omega_k, Ti).$$

Процедура сравнения может быть реализована на последовательности указанных локальных прямоугольников с индексами  $j = 1, \dots, m$ . Окончательное решение о распознавании SC должно производиться с учетом обработки результатов процедур принятия решений на последовательности локальных прямоугольников.

## Список литературы

1. Радиоизлучение Солнца [Электронный ресурс] // Солнечно-земная Физика. Справочник. 2007. URL: [http://www.kosmofizika.ru/spravka/radio\\_sun.htm](http://www.kosmofizika.ru/spravka/radio_sun.htm) (29.11.15).
2. Радишумы как предвестники бури излучения от солнечных выбросов [Электронный ресурс] // URL: <http://livescience.ru/content/view/634/170/> (28.11.15).
3. Kim R.-S., Moon Y.-J., Gopalswamy N., Park Y.-D. and Y.-H. Kim. Two-step forecast of geomagnetic storm using coronal mass ejection and solar wind condition // Space Weather, 2014. № 12. P. 246–256. DOI: [10.1002/2014SW001033](https://doi.org/10.1002/2014SW001033).
4. Space Weather Prediction Center [Электронный ресурс] // URL: <http://www.swpc.noaa.gov> (28.11.15).
5. Advanced Composition Explorer (ACE) [Электронный ресурс] // URL: <http://www.srl.caltech.edu> (27.11.15).
6. Борог В. В. Основы мюонной диагностики: учебное пособие. М.: Изд-во МИФИ, 2008. 160 с.
7. Барбашина Н. С., Дмитриева А. Н., Компаниец К. Г. и др. Исследование динамики глобальных возмущений магнитосферы Земли с помощью мюонных детекторов // Краткие сообщения по физике. М.: Изд-во ФИАН, 2010. № 6. С. 3–5.
8. Wu, J.-G., Landstredt H. Geomagnetic storm predictions from solar wind data with the use of dynamic neural networks // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. P. 14255–14268.
9. Шугай Ю. С., Доленко С. А., Персианцев И. Г., Орлов Ю. В. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования событий и поиска предвестников в многомерных временных рядах // Нейрокомпьютеры: разработка, применение / Изд-во Радиотехника, 2006. 1–2. С. 21–28.
10. Takano S., Arimura H., Nijjima K., Iyemori T., Araki T. Automatic detection of geomagnetic sudden commencement using lifting wavelet filters // Proceedings of the Second International Conference on Discovery Science, LNAI 1721. Springer, 1999. P. 242–251.
11. Hafez A. G., Ghamry E. Wavelet Spectral Analysis Technique for Automatic Detection of Geomagnetic Sudden Commencements // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. Issue 11. P. 4503–4512. DOI: [10.1109/TGRS.2012.2192279](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2192279).
12. **Гетманов В. Г.** Об алгоритме поиска по частоте в задаче оценивания параметров моделей полигармонических сигналов // Автометрия. 2009. № 3. С. 83–89.
13. **Гетманов В. Г.** Цифровая обработка нестационарных колебательных сигналов на основе локальных и сплайновых моделей. М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2011. 298 с.
14. Hlawatch F., Auger F. Time-Frequency Analysis: Concepts and Methods // London (UK): ISTE and Wiley, 2008. 440 p.
15. Марпл мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.
16. Барабанов А. Б. Идентификация параметров полигармонической модели речевого сигнала // Материалы XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014) 16–19.06.2014. М.: 2014. С. 3038–3049.

17. Ramos P. M., Silva M. F., Martins R. C., Serra A. C. Simulation and experimental results of multiharmonic least-squares fitting algorithms applied to periodic signals // IEEE Transactions on Instrumentations and Measurements. 2007. V.56. № 4. P. 1412–1418.
18. Root D. E., Verspecht J., Sharrit D., Wood J. Broad-band poly-harmonic distortion behavioral models from fast automated simulation and large-signal vertical network measurements // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2005. Vol. 53. Issue 11. P. 3656–3664.
19. **Гетманов В. Г.**, Борзунов Г. И. Алгоритм параллельных вычислений для задачи спектрально-временного анализа на базисных полигармонических функциях // Информационные технологии. 2015. Т.21. № 6. С. 456–463.

## **14. 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»

Руководитель проекта директор, академик А. Д. Гвишиани

В 2015 году были выполнены второй и третий этапы проекта «Разработка инновационной технологии и создание экспериментального образца аппаратно-программного комплекса для мониторинга экстремальных геомагнитных явлений с использованием наземных и спутниковых данных» в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

На втором этапе (первое полугодие 2015 г.) проекта осуществлялась первая очередь теоретических исследований. Основными методами являлись классификация данных об экстремальных геомагнитных явлениях, анализ подходов к сбору и систематизации исходной информации для формирования базы данных об экстремальных геомагнитных природных явлениях, формализация математических методов интерполяции, аппроксимации, обработки больших объемов спутниковых и наземных геомагнитных данных и методов выделения сигналов внутреннего и внешнего магнитного поля в геомагнитных данных. За первое полугодие были разработаны:

- система классификации и кодирования данных об экстремальных геомагнитных явлениях;
- методика сбора и систематизации исходной информации для формирования базы данных об экстремальных геомагнитных природных явлениях;
- методы интерполяции и аппроксимации распределения магнитного поля Земли по территории РФ с учетом развития систем мониторинга и оценки геомагнитной обстановки на территории РФ;
- методы системного анализа, основанные на подходах искусственного интеллекта, для обработки больших объемов спутниковых и наземных данных наблюдений магнитного поля Земли.

Были усовершенствованы методы автоматизированного корректного выделения в спутниковых измерениях сигнала внутреннего магнитного поля Земли и регулярных и спорадических вариаций поля, обусловленных внешними источниками. Также были созданы новые индикаторы геомагнитной активности, «космической погоды» и экстремальных событий с использованием данных наземных обсерваторий (рис. 14.1).



**Рисунок 14.1 – Цикл автоматизированного выделения повышенной геомагнитной активности в наземных наблюдениях магнитного поля Земли при помощи новой меры активности**

Основной технологической характеристикой созданной на данном этапе системы классификации, кодирования данных и разработанной методики сбора и систематизации исходной информации является возможность хранения данных об экстремальных геомагнитных природных явлениях в реляционной базе данных, динамически расширяемой по мере внедрения новых индикаторов геомагнитной активности.

Внедрение разработанных математических методов, методических и программно-технических решений позволит повысить эффективность оценки состояния геомагнитного поля на различных временных и пространственных масштабах, включая фоновые состояния и аномалии как внешнего, так и внутреннего магнитного поля. Созданный на данном этапе научно-методический задел может быть использован при создании и организации стабильного функционирования систем оперативного сбора, обработки и систематизации измерений геомагнитного поля, удовлетворяющих и превосходящих современные мировые стандарты, для обеспечения эффективной работы высокотехнологичных предприятий на территории РФ (рис. 14.2).

Во втором полугодии 2015 г. были продолжены теоретические исследования, которые включали в себя развитие методов анализа и моделирования геомагнитной обстановки, выявления характеристик экстремальных геомагнитных событий различной природы, работы по созданию структуры базы данных и других элементов разрабатываемого экспериментального образца аппаратно-программного комплекса (ЭО АПК), а также подготовку к проведению следующих этапов экспериментальных исследований. Для достижения поставленной цели применялись методы сравнительного анализа данных измерений, теоретических оценок, математического моделирования и программных разработок. В процессе работы был выполнен аналитический обзор геомагнитных эффектов экстремальных природных и техногенных процессов, который позволил выявить их характерные геомагнитные сигналы и получить количественные оценки интенсивности по каждому типу геомагнитного возмущения. Были рассмотрены события космической погоды, астрономическая цикличность в намагниченности пород

(рис. 14.3), грозные разряды, космические гамма-вспышки, а также землетрясения, волны цунами, взрывы и волновые атмосферные процессы.

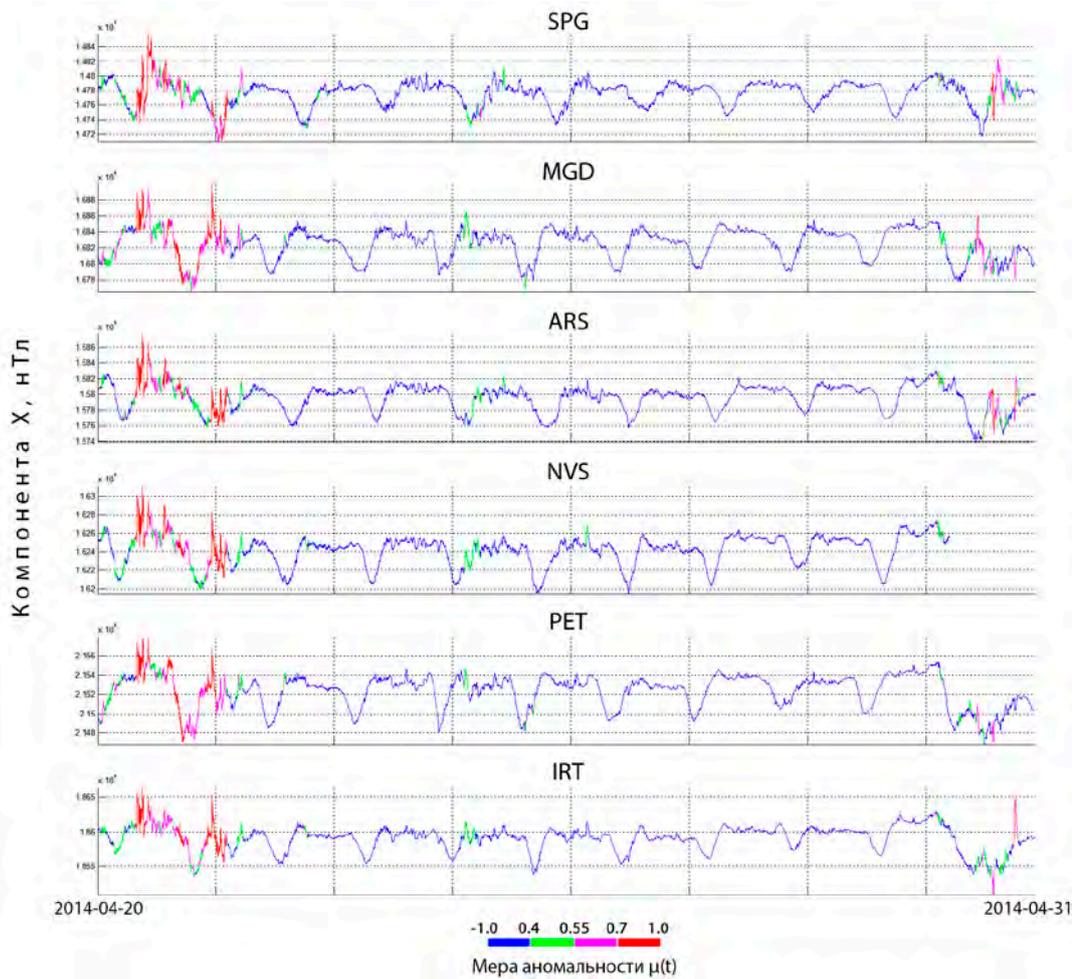


Рисунок 14.2 – Пример одновременного выделения аномалий на множестве записей, полученных из российских обсерваторий Интермагнет за 20–30 апреля 2014 г.

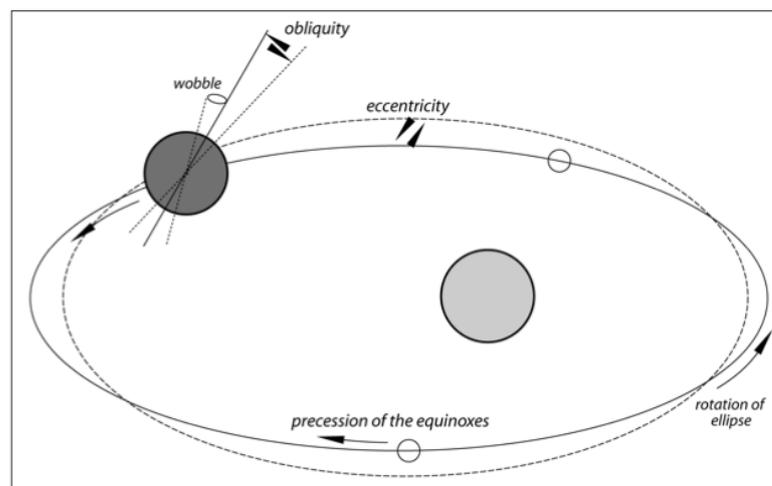
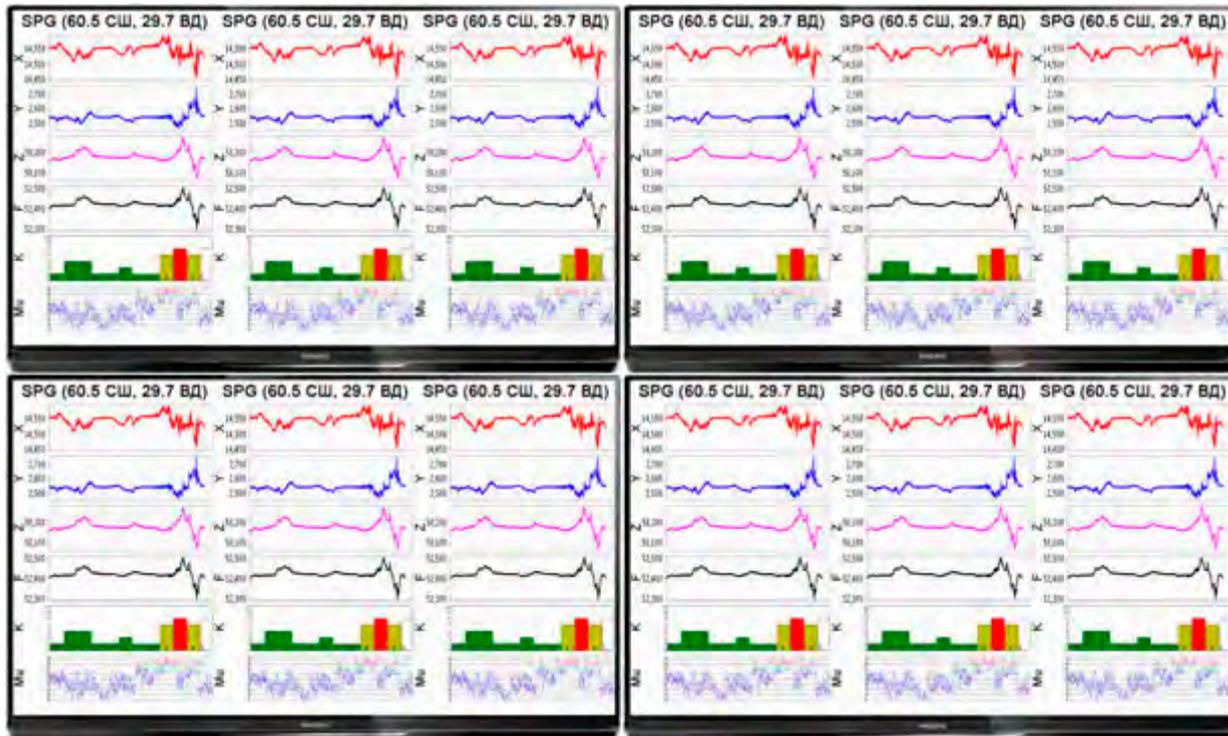


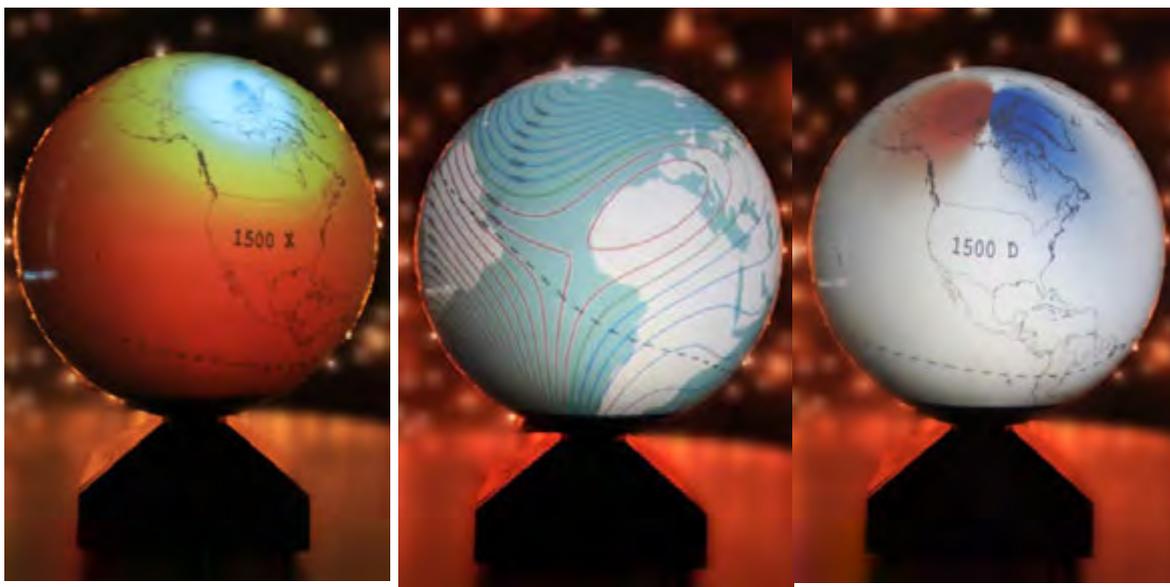
Рисунок 14.3 – Основные параметры астрономической цикличности (по [Stresser et al., 2006])

Было проведено математическое моделирование распределения наземных вариаций внешнего геомагнитного поля. Результаты показали, что в заданной точке на земной поверхности геомагнитные возмущения определяются суперпозицией околоземных, в первую очередь ионосферных, электрических токов, их геометрией и интенсивностью. Для анализа наземных и спутниковых данных магнитных наблюдений предложены методы цифровой фильтрации поступающей информации на основе систем локальных аппроксимационных модельных функций и разработаны реализующие их программы. Разработана методика построения статистической модели распределения электрических токов по данным магнитных измерений над ионосферой спутниками Swarm.

Одной из ключевых функций разрабатываемого ЭО АПК является оперативный сбор, обработка и сохранение геомагнитных данных из обсерваторий, расположенных на территории РФ. Для этого разработаны программные средства (получены свидетельства РИД) для выделения различных аномалий в поступающих данных, автоматического пересчета базисных значений и расчета полных значений элементов поля, что позволяет получать квази-окончательные данные с минимальной задержкой по времени. Разработана база данных для хранения спутниковых магнитных измерений, координированная с окончательными данными российских наземных обсерваторий, а также средства для синхронного отображения результатов непрерывных наблюдений и оценки состояния геомагнитной обстановки на видео-стенде в виде графических магнитограмм по мере их поступления (рис. 14.4) и на сферическом экране (рис. 14.5).



**Рисунок 14.4 – Пример визуализации поступающих измерений магнитного поля и рассчитанных по ним значений индикаторов геомагнитной активности на видеостенде**



**Рисунок 14.5 – Пример визуализации пространственного распределения составляющих магнитного поля Земли по земному шару на сферическом экране**

В соответствии с техническим заданием (ТЗ) были разработаны: полный комплект эскизной технической документации, программа и методика экспериментальных исследований, необходимых для подтверждения соответствия характеристик разработанного ЭО АПК требованиям, указанным в ТЗ. Приведен подробный регламент проведения испытаний, требования к условиям проведения эксперимента, требования к измерительному и испытательному оборудованию, программа экспериментальных исследований, включающая в себя описание проверки соответствия функциональности ЭО АПК, подготовлены протоколы проведения испытаний.

Для освещения и популяризации промежуточных результатов прикладных научных исследований (ПНИ) исполнители приняли участие в нескольких крупных научных мероприятиях и дали интервью для СМИ. Кроме того, для отражения хода выполнения ПНИ был обновлен специализированный веб-сайт по адресу <http://fcp2014.gcras.ru> (рис. 14.6).



Рисунок 14.6 – Веб-сайт о ходе выполнения ПНИ в рамках выполнения работ по проекту

## Список литературы

Stresser A., Hilgen F. J., Heckel P. H. Cyclostratigraphy – concepts, definitions, and applications // Newsletters on Stratigraphy. 2006. Vol. 42. № 2. P. 75–114.

## Свидетельства о государственной регистрации, полученные в рамках проекта

- Свидетельство о государственной регистрации программы для расчета и визуализации базисных значений компонент магнитного поля. Авторы: **Соловьев А. А.**, Кудин Д. В. Регистрационный номер РИД 615042210001, дата регистрации РИД 22.04.2015 г.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для расчета и визуализации разности между скалярными данными и модулем вектора поля, рассчитанным по векторным данным. Авторы: **Соловьев А. А.**, Кудин Д. В. Регистрационный номер РИД 615042210002, дата регистрации РИД 22.04.2015 г.

## Список публикаций, подготовленных в рамках проекта

**Красноперов Р. И., Сидоров Р. В., Соловьев А. А.** Современные геодезические методы высокой привязки геофизических съемок на примере магниторазведки // Геомagnetизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 4. С. 1–10.

# 15. Усовершенствование моделей вариаций геомагнитного поля с использованием новых данных обсерваторий российско-украинского сегмента сети Интермагнет

Грант РФФИ № 14-05-90419

Руководитель проекта директор ГЦ, академик А. Д. Гвишиани.

Ответственный исполнитель зам. директора по науке, д.ф.-м.н. Ан. А. Соловьев

В 2015 г. в рамках проекта была реализована загрузка и обработка секундных геомагнитных данных. Также было настроено применение к ним алгоритма выделения выбросов SPs, разработанного в ГЦ РАН, для предварительной очистки секундных данных от техногенных помех. В настоящий момент в непрерывном режиме загружаются оперативные секундные данные обсерваторий «Климовская» (KLI), Архангельская обл., «Санкт-Петербург» (SPG), Ленинградская обл., и «Москва» (MOS), Московская обл. Схема разработанных таблиц базы данных приведена на рис. 15.1. Данные по каждой компоненте и полной напряженности поля хранятся упакованными по часам, что обеспечивает повышенную скорость выполнения запросов к базе по сравнению с неупакованным хранением.

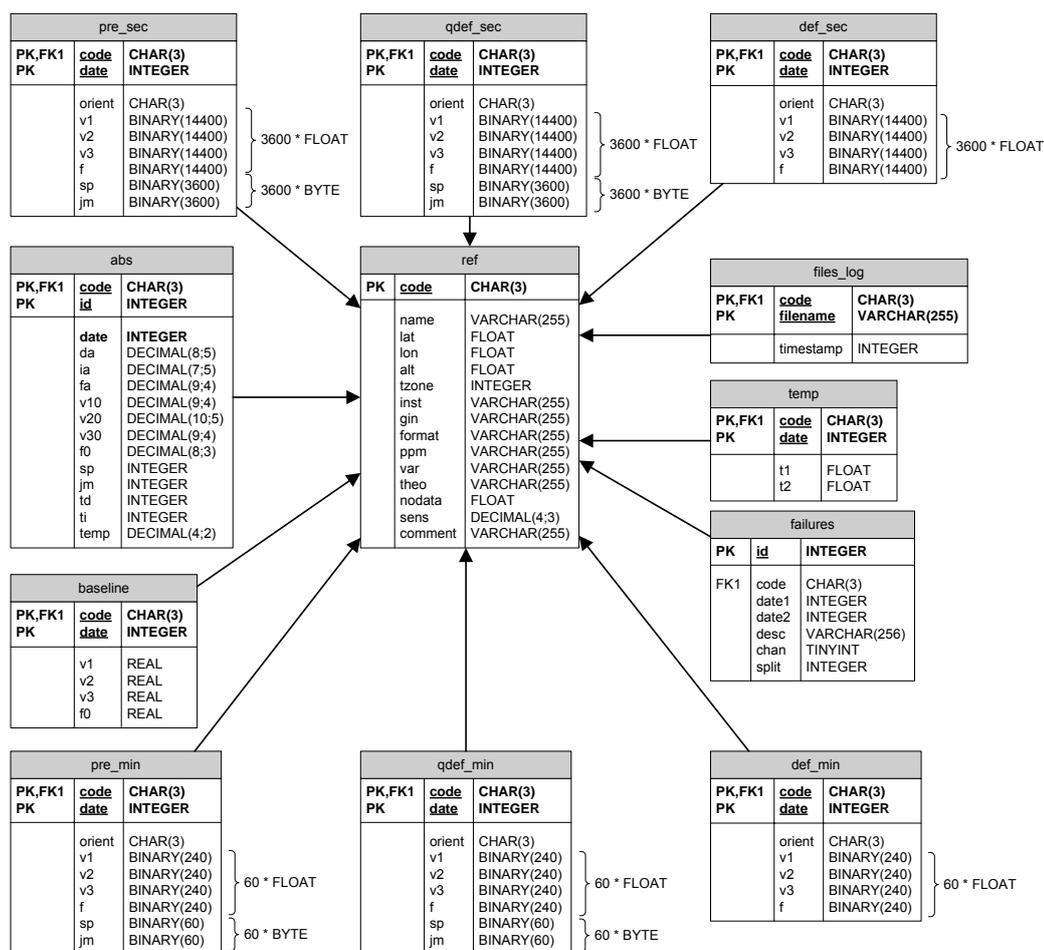


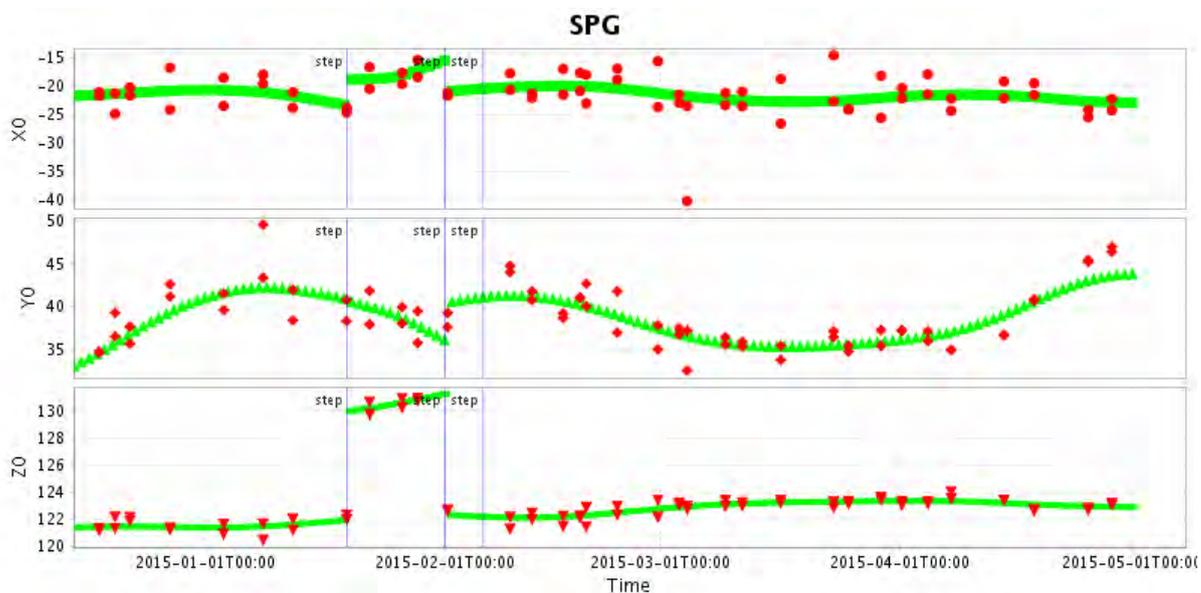
Рисунок 15.1 – Схема БД Российско-украинского центра геомагнитных данных, обеспечивающей хранение минутных и секундных наблюдений магнитного поля Земли

В 2015 г. была запущена служба для расчета и отображения абсолютных данных и базисных значений в режиме онлайн: <http://geomag.gcras.ru/dataserv-abs.html>. В работу Российско-украинского центра геомагнитных данных была внедрена система автоматизированного расчета квазиокончатальных данных. Расчет квазиокончатальных данных состоит из двух основных этапов: обработка непрерывных векторных измерений магнитного поля, распознавание и удаление сбоев (техногенных аномалий) на магнитограммах и контроль качества; определение базисных значений по результатам абсолютных наблюдений и расчет по ним временных рядов полных значений элементов поля. В случае Российско-украинского центра геомагнитных данных процедура распознавания техногенных выбросов во многом автоматизирована. Пересчет базисных значений и последующий пересчет квазиокончатальных данных происходит автоматически каждый раз при поступлении новых результатов абсолютных наблюдений. Для пересчета регулярных вариаций компонент в полные значения элементов поля требуется регуляризация базисных значений. Согласно требованиям Интермагнет [St-Louis, 2012] такая регуляризация должна обеспечивать шаг дискретизации 1 сутки с привязкой регулярных базисных значений к 12:00:00 UT каждых суток. Обычно для аппроксимации значений используется метод сглаживающего сплайна, входящий в инструментарий Curve Fitting Toolbox для Matlab (функция csaps).

Согласно правилам Интермагнет базисная кривая должна строиться по наблюдаемым базисным значениям начиная с 1 декабря предыдущего года. При построении аппроксимации учитываются и исключаются из рассмотрения такие сбои, как выбросы и скачки. Причиной скачков в наблюдаемых базисных значениях (рис. 15.2) могут быть изменение настроек вариометра, его перемещение и др. Информация о подобных событиях отслеживается сотрудниками обсерватории и заносится в базу геомагнитных данных при помощи специальной веб-формы. В центре геомагнитных данных обработка таких событий автоматизирована. В соответствующий момент времени осуществляется разрыв сплайна, после чего он перестраивается по отдельным сегментам до и после момента события. Финальный вариант базисной кривой для каждой из компонент сохраняется в базе геомагнитных данных.

Далее происходит расчет полных значений компонент поля (квазиокончатальных данных) с использованием регулярных базисных кривых и вариационных значений за период с 1 декабря предыдущего года. Как было отмечено выше, в течение каждых суток в UT принимается единое базисное значение для каждой компоненты. Результаты расчета абсолютных и базисных значений, базисных кривых, а также квазиокончатальных данных сохраняются в отдельном разделе базы геомагнитных данных.

Полученные квазиокончатальные данные доступны в цифровом формате в разделе <http://geomag.gcras.ru/dataproduct-down.html> и графическом формате в разделе <http://geomag.gcras.ru/dataproduct-plot.html>. Подробно автоматизированный расчет квазиокончатальных данных был опубликован на сайте Российско-украинского центра геомагнитных данных: <http://geomag.gcras.ru/materials-man.html>.



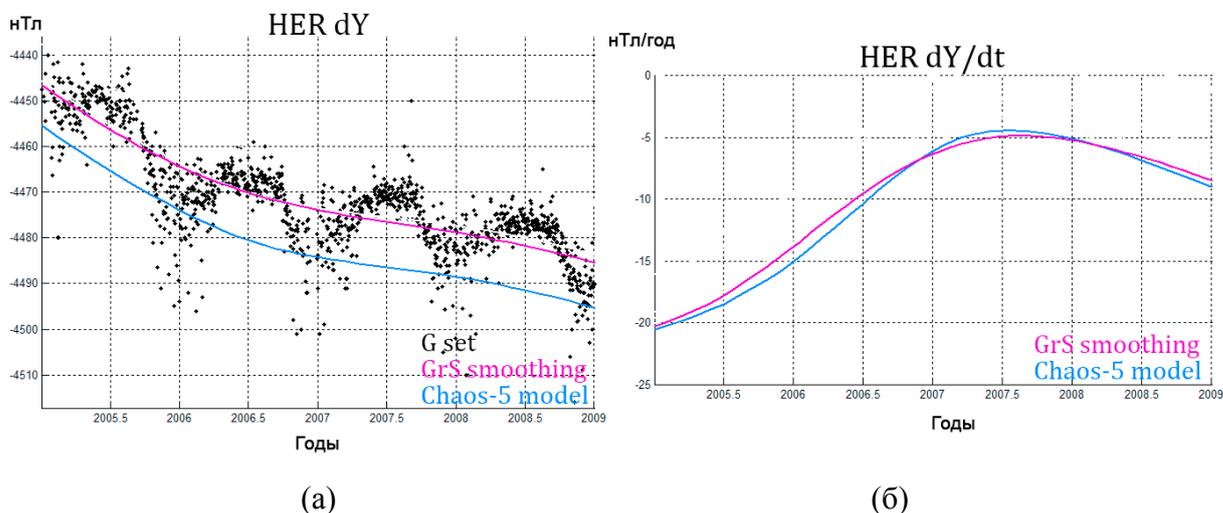
**Рисунок 15.2 – Примеры скачков техногенной природы в базисных значениях (вертикальные линии). Красными маркерами помечены наблюдаемые базисные значения, зелеными – регулярные, аппроксимированные базисные значения (<http://geomag.gcras.ru>)**

Используя разработанную систему автоматизированного расчета квазиокончатальных данных, в 2015 г. были подготовлены окончательные данные обсерватории Интермагнет «Арти» за 2014 г. и предоставлены в Исполком Интермагнет. При предварительной проверке качество расчетов было высоко оценено экспертами по данным Интермагнет. В частности, амплитуда  $\Delta F$  не превышает 2 нТл для всех минутных данных в течение года, изменение базисной линии в течении года для  $H_0 = 25$  нТл,  $D_0 = 3$  угл. мин.,  $Z_0 = 18$  нТл, количество потерь не превышает 5%.

С использованием метода гравитационного сглаживания были построены модели векового хода (ВХ) на базе данных российских и зарубежных обсерваторий. В рамках проекта был проведен анализ результатов метода с целью оценки адекватности получаемых кривых ВХ. Для этого рассматривалась обширная выборка наблюдений трех составляющих (северной  $X$ , восточной  $Y$  и вертикальной  $Z$ ) и полной напряженности ( $F$ ) МПЗ. Наблюдения были получены за период 1997–2013 гг. на 17 обсерваториях по всему миру.

Данные обсерваторий послужили основой для оценки эффективности разработанного метода. Оценка осуществлялась путем сравнения полученных результатов при помощи гравитационного сглаживания с результатами расчета ВХ с использованием наиболее точной модели ГМПЗ Chaos-5 [Finlay et al., 2015]. Точность модели обеспечивается, в частности, за счет географически-однородных данных наблюдений МПЗ, полученных спутниками Swarm последнего поколения [Friis-Christensen et al., 2006] и лежащих в основе ее создания. Chaos-5 позволяет моделировать магнитное поле ядра Земли (коэффициенты разложения до 20-й степени), аномальное литосферное поле (коэффициенты разложения с 21-й до 85-й степени), а также внешнее поле за период с

1997.0 по 2015.0 с временным шагом 0.1 год. В настоящем исследовании модель Chaos-5 применялась для расчета ВХ в точках установки обсерваторий на поверхности Земли с учетом вклада магнитного поля ядра Земли и литосферного поля. Пример рядов  $dY$  и  $dY/dt$ , полученных методом гравитационного сглаживания и Chaos-5, представлен на рис. 15.3.



**Рисунок 15.3 – Анализ вековых вариаций на обсерватории HER (ЮАР):  $dY$  (а) и  $dY/d$  (б), построенные методом гравитационного сглаживания и рассчитанные согласно модели Chaos-5, с 2005.0 по 2009.0 годы. На рис. (а) черными точками отмечены исходные наблюдения, к которым применялось гравитационное сглаживание с весами**

Количественное сравнение осуществлялось с использованием корреляционного анализа результатов, полученных за 1997–2013 гг. двумя разными методами по каждой из компонент для каждой обсерватории. В качестве количественной меры схожести результатов использовался коэффициент корреляции Пирсона. По результатам вычислений коэффициентов корреляции по каждой компоненте были построены гистограммы, отражающие значение коэффициента для той или иной обсерватории. Коэффициенты корреляции рассчитывались как для исходных значений компонент, сглаженных при помощи разработанного метода и полученных согласно модели Chaos-5, так и для вычисленных по ним первых производных (ВХ).

Наилучшая согласованность результатов наблюдается при сравнении компонент  $Y$  и  $Z$ , для которых коэффициент корреляции лежит в пределах 0,9–1,0. При сравнении исходных вариаций компоненты  $X$  коэффициент корреляции также близок к 1,0, однако разброс значений коэффициента корреляции между производными  $dX/dt$  чуть больше, чем в случае  $dY/dt$  и  $dZ/dt$ . Для большинства обсерваторий он находится в пределах 0,8–1,0. Таким образом, сравнение с высокоточными моделями магнитного поля показало высокую степень согласованности результатов на представительной выборке данных.

Был существенно расширен функционал веб-портала Российско-украинского центра геомагнитных данных. В частности, на базе непрерывно поступающих в геомагнитный центр данных была разработана система автоматического оповещения по электронной

почте о повышенной геомагнитной активности. При каждом поступлении новых данных система оценивает максимальную амплитуду возмущений на всех доступных на данный момент обсерваториях в суточном окне. Если количество обсерваторий, на которых наблюдается превышение порогового значения (например, 150 нТл), больше двух, то по указанным электронным адресам автоматически рассылается соответствующее предупреждение со списком обсерваторий, средним, минимальным и максимальным значениями амплитуд. Кроме того, был разработан и внедрен на веб-портале Российско-украинского центра геомагнитных данных счетчик запросов данных отдельно по каждой обсерватории и по типу запрашиваемых данных (<http://geomag.gcras.ru/stat/stats.php>). При запуске приложения статистика формируется за любой интервал времени, начиная с 1 апреля 2015 г.

### **Список литературы**

1. Finlay, C.C., Olsen, N. and Toffner-Clausen, L., (2015) DTU candidate field models for IGRF-12 and the CHAOS-5 geomagnetic field model // *Earth Planets and Space*, 67, 114. DOI:10.1186/s40623-015-0274-3.
2. Friis-Christensen E., Lühr H., Hulot G. Swarm: A constellation to study the Earth's magnetic field // *Earth, Planets and Space*. V. 58. P. 351–358. 2006.
3. St-Louis B., Ed. INTERMAGNET Technical Reference Manual, Version 4.6. 2012.

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

Грант РФФИ № 15-05-07436

Руководитель проекта директор, академик А. Д. Гвишиани.

Ответственный исполнитель к.ф.-м.н. Ш. Р. Богоутдинов

Выполненная в течение отчетного года работа была посвящена новой технике работы с одномерными, в общем случае, нерегулярными временными рядами. Исследования касались главным образом двух вопросов: меры активности временных рядов и их регрессионных производных.

Меры активности временного ряда характеризуют с разных сторон его активность. Точки, в которых локальная активность велика, считаются локально аномальными. Глобальные аномалии получаются из локально аномальных точек с помощью ДМА-кластеризации и исследуются методами ДМА.

В последнее время наиболее важные результаты в ДМА связаны с новым понятием регрессионной производной. В рамках настоящего проекта для одномерных, в общем случае, нерегулярных временных рядов установлена связь между трендами и участками знакопостоянства их регрессионных производных, что, в свою очередь, дало понимание экстремумов, как моментов смены знака производной.

Кроме того, регрессионные производные послужили основой гладких моделей временных рядов и аномалий, как больших отклонений от этих моделей.

Период наблюдений.  $T$  – конечное, в общем случае, нерегулярное множество узлов  $t_i$ :

$$T = \{t_1 < t_2 < \dots < t_N\} = \{t_i |_1^N\}.$$

Функция  $f$  – временной ряд, заданный на  $T$ :

$$f: T \rightarrow \mathbb{R}; f: \{f_i = f(t_i) |_1^N\}.$$

Динамический показатель  $D$  – функционал на  $T$ , параметризованный  $T$ :

$$D: \mathcal{F}(T) \times T \rightarrow \mathbb{R},$$

$\mathcal{F}(T)$  – пространство функция на  $T$ .

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

## Близость на $T$

Пусть  $h > 0, p \geq 0, T = \{t_1 < \dots < t_N\}$ . Использовались три варианта близости:

а) 
$$\delta_i(j) = \left(1 - \frac{|t_i - t_j|}{t_N - t_1 + h}\right)^p;$$

$$\text{б) } \delta_i(j) = \left(1 - \frac{|t_i - t_j|}{\max(t_N - t_i, t_i - t_1) + h}\right)^p;$$

$$\text{в) } \delta_i(j) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|t_i - t_j|}{h}\right)^p, & \text{если } |t_i - t_j| \leq h \\ 0, & \text{если } |t_i - t_j| > h \end{cases}.$$

### Динамические показатели

Пусть  $\delta_i(j)$  – одна из мер близости узла  $t_j$  к узлу  $t_i$  в  $T$ . Пример: задана функция на рис. 16.1

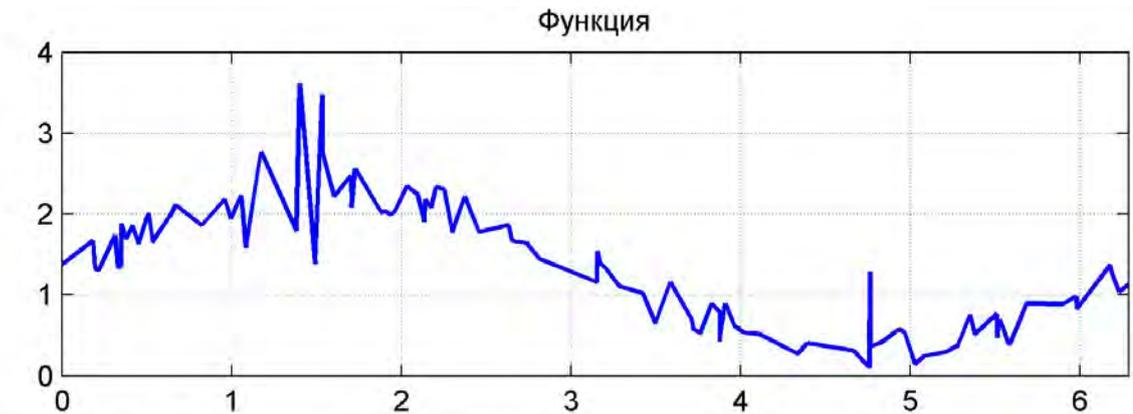


Рисунок 16.1 – Модельная функция

1. Энергия (рис. 16.2)

$$E_f(t_i|\delta) = \frac{\sum_{j=1}^N |f_j - M_f(t_i|\delta)| \delta_i(j)}{\sum_{j=1}^N \delta_i(j)},$$

$$\text{где } M_f(t_i|\delta) = \frac{\sum_{j=1}^N f_j \delta_i(j)}{\sum_{j=1}^N \delta_i(j)}.$$

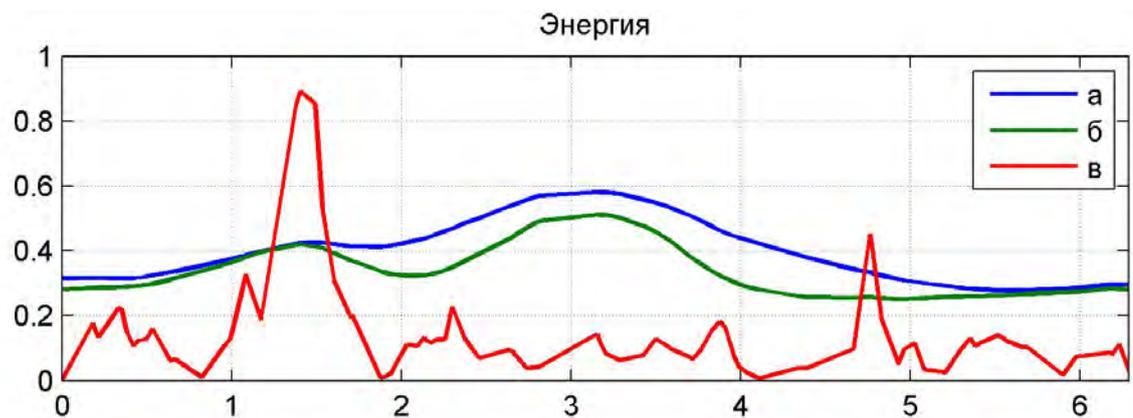


Рисунок 16.2 – Динамический показатель «Энергия» для различных мер близости для модельной функции (рис. 16.1)

2. Изрезанность (рис. 16.3)

$$L_f(t_i|\delta) = \frac{\sum_{j=1}^N |f_{\delta'}(t_j)| \delta_i(j)}{\sum_{j=1}^N \delta_i(j)},$$

где  $f_{\delta'}(t_j)$  – ДМА-производная функции  $f$  по близости  $\delta$

$$f_{\delta'}(t_j) = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{k=1}^N \delta_j(k) f_k t_k & \sum_{k=1}^N \delta_j(k) t_k \\ \sum_{k=1}^N \delta_j(k) f_k & \sum_{k=1}^N \delta_j(k) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum_{k=1}^N \delta_j(k) t_k^2 & \sum_{k=1}^N \delta_j(k) t_k \\ \sum_{k=1}^N \delta_j(k) t_k & \sum_{k=1}^N \delta_j(k) \end{vmatrix}}.$$

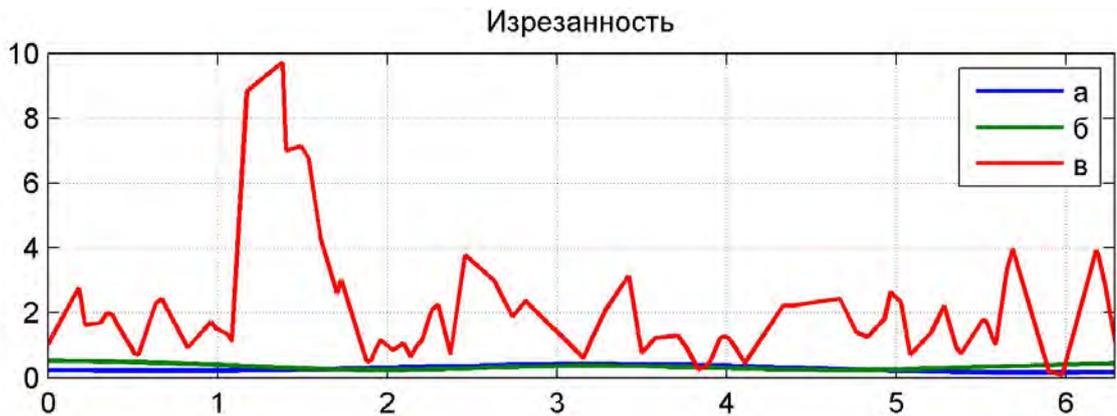


Рисунок 16.3 – Динамический показатель «Изрезанность» для различных мер близости

3. Разброс: пусть  $p > 0$ , положим (рис. 16.4)

$$O_f(t_i|\delta, p) = M_f(t_i|\delta, p) - M_f(t_i|\delta, -p),$$

где

$$M_f(t_i|\delta, p) = \left( \frac{\sum_{j=1}^N f_j^p \delta_i(j)}{\sum_{j=1}^N \delta_i(j)} \right)^{\frac{1}{p}},$$

$$M_f(t_i|\delta, -p) = \left( \frac{\sum_{j=1}^N f_j^{-p} \delta_i(j)}{\sum_{j=1}^N \delta_i(j)} \right)^{-\frac{1}{p}}.$$

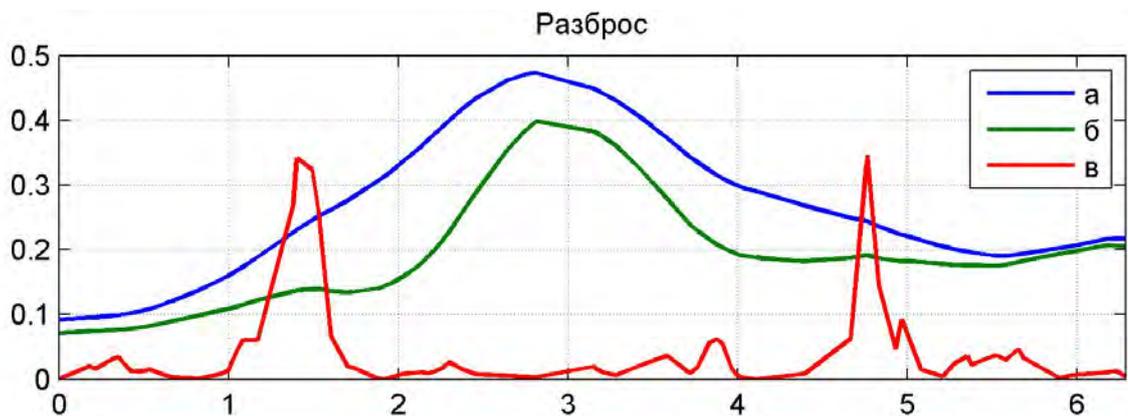


Рисунок 16.4 – Динамический показатель «Разброс» для различных мер близости

Как видно из рис. 16.2–16.4, наиболее адекватную картину аномальностей исходной функции (рис. 16.1) дают динамические показатели, построенные с помощью локальной меры близости ( $v$ ), поэтому в дальнейших исследованиях будем использовать только ее.

## Меры активности

Мера активности временного ряда в момент времени отвечает в шкале на вопрос: «В какой степени происходящее на  $f$  в момент  $t$  активно на нем?». Другими словами, — функция принадлежности, в рамках теории нечетких множеств, нечеткого понятия активности применительно к ряду. Активность – понятие многозначное, зависящее от точки зрения эксперта. Сначала выбирается такая точка зрения, затем она моделируется вспомогательным рядом  $\equiv$  динамическими показателями (моделируется само понятие активности, его количественное выражение). Нормирующий переход в рамках ДМА реализуется с помощью ДМА-сравнений, т.е. выражения в шкале отрезка степени максимальности активности по сравнению со значениями активности в других точках.

Мера активности разбивает ряд на три части: спокойную, беспокойную и аномальную. Спокойная часть соответствует значениям меры активности от 0 до 0,5, беспокойная – от 0,5 до 0,75, аномальная – от 0,75 до 1.

Нечеткое сравнение  $n(a, b)$  на действительных числах  $a$  и  $b$  измеряет в знакопеременной шкале отрезка  $[-1, 1]$  степень превосходства “ $b$ ” над “ $a$ ”:

$$n(a, b) = \text{mes}(a < b) \in [-1, 1].$$

С формальной точки зрения роль нечеткого сравнения может играть любая функция  $f(a, b), f: \mathbb{R}^2 \rightarrow [-1, 1]$ , возрастающая по  $b$  и убывающая по  $a$  с дополнительными граничными условиями:

$$\forall a \lim_{b \rightarrow \pm\infty} f(a, b) = \pm 1, \quad \forall b \lim_{a \rightarrow \pm\infty} f(a, b) = \mp 1, \quad \forall a f(a, a) = 0.$$

Примеры нечетких сравнений:

$$1. n(a, b) = \frac{b-a}{\max(|a|, |b|)},$$

$$2. n(a, b) = \frac{b-a}{1+|b-a|}.$$

Пусть  $A = \{0 \leq a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_N\}$ ,  $b > 0$  и  $n(a, b)$  – определенное выше нечеткое сравнение. Тогда

$$n(A, b) = \frac{\sum_i n(a_i, b)}{N} \in [-1, 1]$$

$$n(b, A) = \frac{\sum_i n(b, a_i)}{N} \in [-1, 1]$$

будут расширениями  $n$  до сравнения  $A$  с  $b$  ( $b$  с  $A$ ).

Отсюда мера активности точки  $b$  (степень максимальности активности точки по сравнению со значениями активности в других точках) равна

$$ma(b, A) = \frac{n(b, A) + 1}{2} \in [0, 1].$$

## Монотонность и экстремумы

Динамический показатель «Изрезанность» был построен на основе так называемой регрессионной производной (рис. 16.5). Ее использование для произвольного временного ряда позволяет определять области его монотонного убывания или возрастания, а также искать экстремумы.

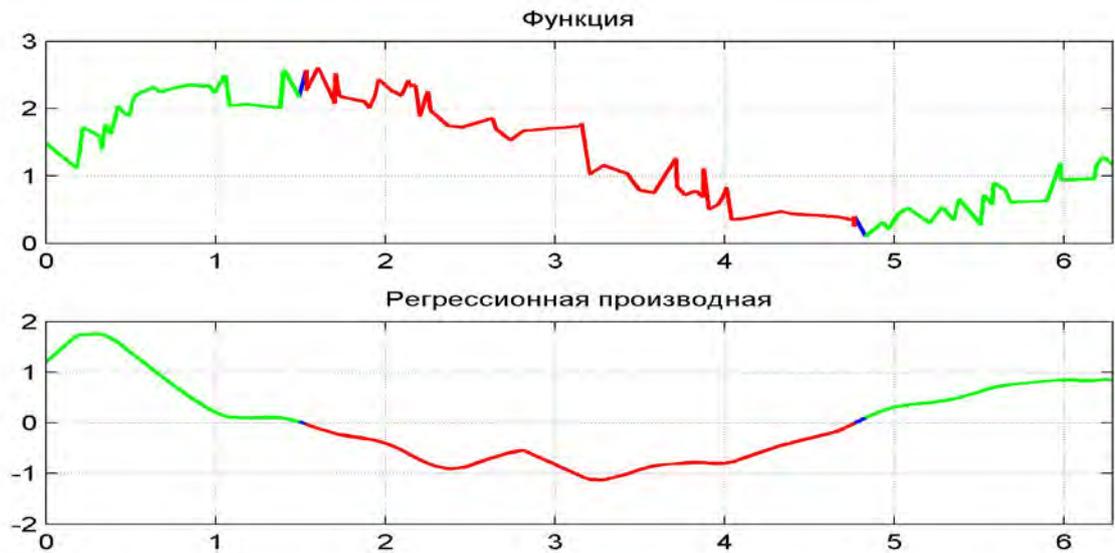


Рисунок 16.5 – Области монотонности на основе регрессионных производных

## Регрессионные сглаживания

Регрессионный функционал для функции  $f$  в узле  $t_i$ :

$$J(a, b|f, \delta, t_i) = \sum_{i=1}^N (at_i + b - f_i)^2 \delta_i(\bar{i}) w(\bar{i}).$$

Уравнения на регрессионную касательную прямую для функции  $f$  в узле  $t_i$ :

$$f'(t_i) \sim a^*(t_i)t + b^*(t_i) = a^*t + b^*,$$

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial a} = \sum_{i=1}^N t_i (a^*t_i + b^* - f_i) \delta_i(\bar{i}) w(\bar{i}) = 0, \\ \frac{\partial J}{\partial b} = \sum_{i=1}^N (a^*t_i + b^* - f_i) \delta_i(\bar{i}) w(\bar{i}) = 0, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left( \sum_{\bar{i}=1}^N t_{\bar{i}}^2 \delta_{\bar{i}}(\bar{i}) w(\bar{i}) \right) a^* + \left( \sum_{\bar{i}=1}^N t_{\bar{i}} \delta_{\bar{i}}(\bar{i}) w(\bar{i}) \right) b^* = \sum_{\bar{i}=1}^N t_{\bar{i}} \delta_{\bar{i}}(\bar{i}) w(\bar{i}) f_{\bar{i}}, \\ \left( \sum_{\bar{i}=1}^N t_{\bar{i}} \delta_{\bar{i}}(\bar{i}) w(\bar{i}) \right) a^* + \left( \sum_{\bar{i}=1}^N \delta_{\bar{i}}(\bar{i}) w(\bar{i}) \right) b^* = \sum_{\bar{i}=1}^N \delta_{\bar{i}}(\bar{i}) w(\bar{i}) f_{\bar{i}}. \end{cases}$$

Сглаживание  $Smf$ , основанное на регрессионной касательной прямой  $f'(t_i)$  (рис. 16.6):

$$Smf(t_i) = \psi'_{f,t_i}(t_i), \text{ где } \psi_{f,t_i}(t_j) = f'(t_j)(t_i).$$

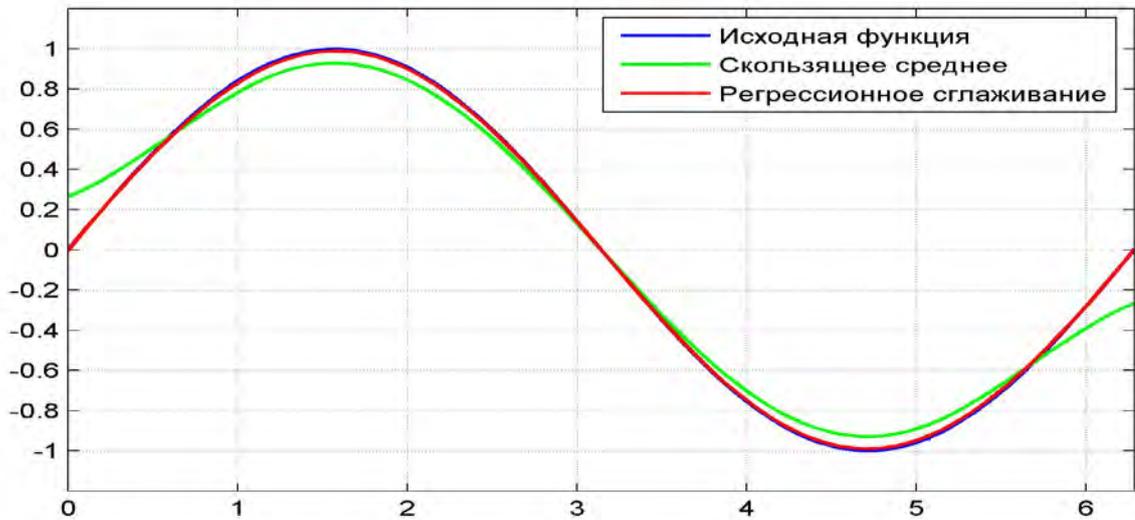


Рисунок 16.6 – Регрессионное сглаживание в регулярном случае

Разработанное регрессионное сглаживание способно работать не только на регулярной сетке, но и на нерегулярной (рис. 16.7).

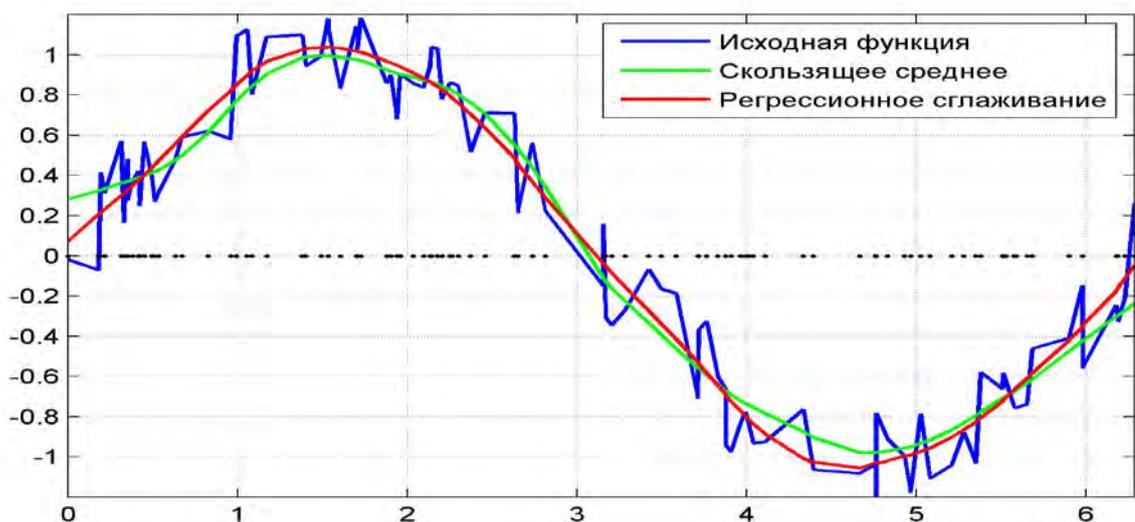


Рисунок 16.7– Регрессионное сглаживание на нерегулярной сетке

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

Грант РФФИ № 15-35-20983

Руководитель проекта зам. директора по науке, д.ф.-м.н. Ан. А. Соловьев

За отчетный период были изучены и отобраны данные геофизических наблюдений, которые служат исходным материалом для проводимых исследований. К ним относятся:

- геомагнитные измерения, регистрируемые спутниками Swarm [Friis-Christensen et al., 2006; Olsen et al., 2013],
- наземные геомагнитные наблюдения Интермагнет [St-Louis, 2012],
- цифровые данные о литосферных магнитных аномалиях WDMAM 2.0 [Dyment et al., 2015],
- сейсмологические данные USGS (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>),
- метеорологические наблюдения, доступные через сервис OpenWeatherMap и регистрируемые спутниками Электро-Л,
- измерения гравитационного поля спутником GOCE и построенные на их основе вторичные продукты (Level-2 products),
- цифровые карты рельефа: радарная топографическая съемка SRTM и глобальная модель рельефа GEBCO.

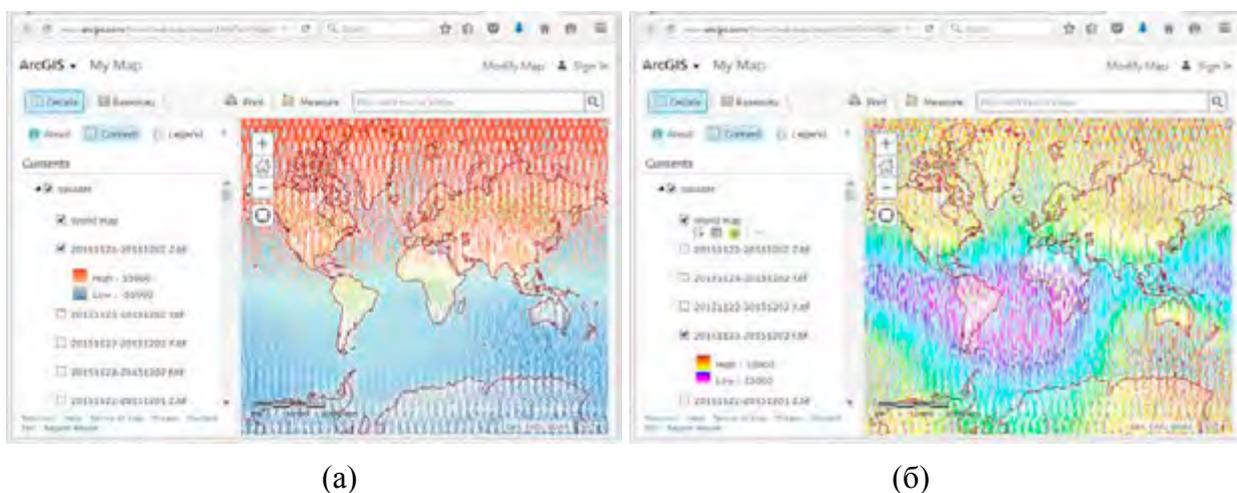
При изучении спутниковых геомагнитных наблюдений отдельно анализировались годовые изменения плоскости орбиты спутников Swarm относительно направления Солнце–Земля. Было выявлено, что полный цикл охвата всех часовых поясов примерно составляет от четырех до четырех с половиной месяцев. Апробация визуализации данных на сферическом экране производилась на примере автоматической загрузки актуальных данных с сайта USGS в формате GeoJSON за последнюю неделю. При этом использовалось ПО «Орбус» (разработчик – ГЦ РАН).

Была предложена единая система хранения наземных и спутниковых данных, а также метаданных в среде ГИС. В качестве основного инструмента для работы с геопространственными данными в рамках проекта выбран специализированный программный пакет ESRI ArcGIS. Пространственные данные планируется хранить в формируемой в рамках проекта единой базе геоданных под управлением системы управления базой данных (СУБД) MS SQL. Такой подход является наиболее эффективным и гибким, обеспечивая хранение данных в унифицированном ГИС-совместимом виде. Метаданные являются неотъемлемой частью элемента в используемой ГИС и хранятся в системных таблицах базы геоданных. Пакет ArcGIS обеспечивает доступ к метаданным всех элементов как XML-документу, независимо от того, как они хранятся физически. В ArcGIS предусмотрена поддержка национального стандарта РФ

ГОСТ Р 52573–2006, регламентирующего формат метаданных, в ходе работ была выбрана соответствующая спецификация.

Был разработан подход для автоматизированного получения исходных данных с удаленных серверов и помещения их в единое хранилище с использованием картографических сервисов. В настоящем проекте для реализации этого подхода использован пакет ArcGIS Server. При публикации картографических сервисов может быть активирован целый набор функций (публикация в сети динамических карт, веб-картографирование, пространственные и атрибутивные запросы к данным, совместное использование растровых наборов данных через Интернет, ...). Выбранный подход позволяет как хранить данные на географически распределенных серверах, так и получать доступ к географически распределенным данным, тем самым реализуя распределенную файловую систему.

Была разработана технология оперативного онлайн-мониторинга геомагнитных наблюдений, непрерывно поступающих с трех спутников Swarm. На базе нее было реализовано веб-ориентированное ГИС-приложение (<http://geomag.gcras.ru/dataserv-gis.html>), при помощи которого геомагнитные данные, накопленные за период 10 дней, автоматически преобразуются в растровые ГИС-слои и добавляются в общее хранилище данных. Процедура повторяется с временным шагом 1 день, что соответствует периодичности обновления базы данных Европейского космического агентства. Пример визуализации спутниковых данных приведен на рис. 17.1.



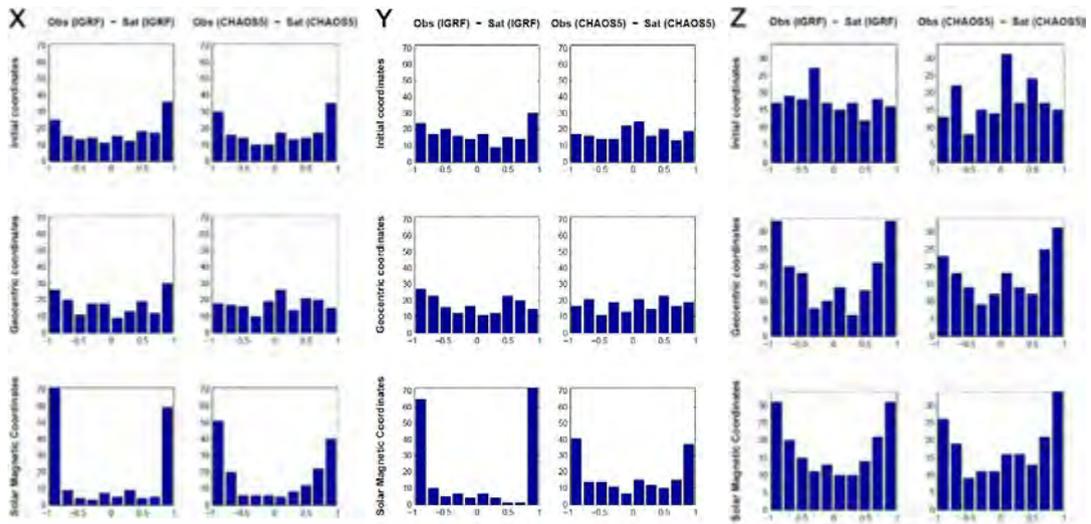
**Рисунок 17.1 – Веб-ориентированное ГИС-приложение интерактивной визуализации прямых наблюдений магнитного поля Земли, регистрируемых тремя спутниками Swarm: вертикальная компонента (а) и полная напряженность (б) магнитного поля. На рисунках представлены данные, полученные за 10-дневный интервал с 23.11 по 02.12.2015**

Для спутниковых и наземных измерений магнитного поля была разработана система пространственно-временной синхронизации получаемых данных, позволяющая анализировать измерения в единой солнечно-магнитной системе геомагнитных координат

и временной шкале. Созданный программно-алгоритмический комплекс позволяет из базы извлекать данные, зарегистрированные спутниками Swarm при пролетах над указанными обсерваториями с заданной окрестностью за указанный временной интервал, и соответствующие обсерваторские данные [Love and Chulliat, 2013]. В настоящем исследовании рассматривался период с 01.01 по 31.12.2014, размер окрестности – 6х6 градусов. Для возможности проведения корректного сравнительного анализа спутниковых и наземных измерений была реализована функция автоматической трансформации локальных систем геомагнитных координат. Временные отсчеты наблюдений на обсерваториях и спутниках ведутся в единой шкале UTC, что обеспечивает временную синхронизацию данных, полученных на Земле и в космосе.

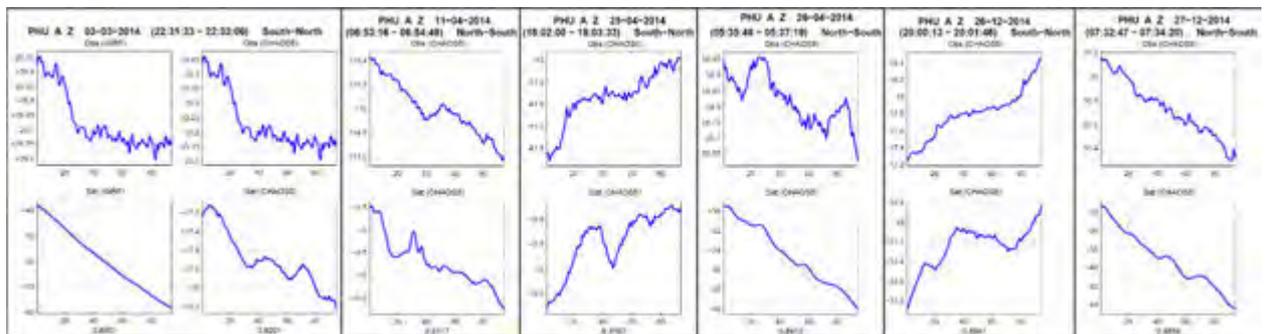
Для последующего сравнения вариаций внешнего поля в рамках разработанной системы предусмотрена функция вычитания вклада внутреннего магнитного поля Земли из спутниковых и наземных данных. Сигнал внутреннего поля рассчитывается тремя способами: согласно модели IGRF-12 [Thebault et al., 2015], согласно модели CHAOS-5 [Finlay et al., 2015] и согласно методу гравитационного сглаживания [Гвишиани и др., 2011], который позволяет выделять длиннопериодный сигнал вдоль траектории пролета спутника. Дополнительно была реализована функция, обеспечивающая через промежуточную трансформацию в географическую систему координат конечное преобразование в солнечно-магнитную систему исходных измерений [Hargood, 1992], полученных как обсерваториями, так и спутниками.

В настоящей работе был разработан метод, позволяющий проводить корреляционный анализ непосредственно фрагментов рядов наблюдений трех компонент вектора магнитного поля, зарегистрированных обсерваториями и спутниками при пролетах над окрестностью обсерваторий размером 6х6 градусов. Метод был опробован на данных, зарегистрированных за период 2014 г. При каждом пролете рассчитывается коэффициент корреляции Пирсона между обсерваторскими и спутниковыми наблюдениями при разных подходах к вычитанию вклада внутреннего поля Земли в разных системах геомагнитных координат. Анализ построенных гистограмм показал изменчивость в согласованности наземных и спутниковых данных в солнечно-магнитной системе координат в зависимости от их расположения (рис. 17.2).



**Рисунок 17.2 – Гистограммы распределения коэффициента корреляции между спутниковыми (Swarm-A) и обсерваторскими (обсерватория IPM) измерениями трех компонент X, Y и Z за вычетом вклада внутреннего магнитного поля Земли**

Предварительный анализ данных показал, что на приэкваториальных геомагнитных широтах возрастает корреляция и антикорреляция данных. В самих рядах наблюдений, при этом, преимущественно наблюдаются устойчивые линейные тренды (рис. 17.3).



**Рисунок 17.3 – Примеры сравнения наблюдений по компоненте Z между обсерваторией PNHU и спутником Swarm-A. Внизу под каждой парой графиков приведено значение коэффициента корреляции. Временной отрезок пролета (UT) и направление движения спутника относительно обсерватории указано сверху (South–North или North–South)**

Разработанный подход к изучению корреляции спутниковых и наземных наблюдений может быть использован для калибровки и валидации спутниковых измерений, а также для уточнения моделей внешнего магнитного поля и создаваемых им наземных вариаций.

В ходе проекта были разработаны методы базовой визуализации исходных данных на сферическом дисплее. Разработанное программное обеспечение «Орбус» обеспечивает интерактивную визуализацию данных на сферическом экране и включает возможность подготовки данных к визуализации (редактор сферических презентаций). Представление слайдов возможно в 2х основных режимах: интерактивный режим и режим

автопрезентации. Интерактивный режим удобен для самостоятельного изучения каких-либо данных с возможностями произвольного вращения глобуса, настройки скорости воспроизведения анимации и пр. В режиме автопрезентации показ слайдов осуществляется автоматически с заранее настроенными параметрами. На основном экране компьютера/ноутбука отображается графический интерфейс для управления визуализацией и графическое окно с глобусом в обычной перспективной проекции. Изображения на сферическом дисплее и в программе управления визуализацией полностью синхронизированы (рис. 17.4).



**Рисунок 17.4 – Изображение на основном экране (а), изображение, которое выводится на сферический экран (б)**

### Список литературы

1. А. Д. Гвишиани, С. М. Агаян, Ш. Р. Богоутдинов, А. И. Каган, Гравитационное сглаживание временных рядов // Тр. ИММ УрО РАН. 17. № 2. 2011. С. 62–70
2. Dyment, J., Lesur, V., Hamoudi, M., Choi, Y., Thebault, E., Catalan, M., the WDMAM Task Force, the WDMAM Evaluators, and the WDMAM Data Providers (2015), World Digital Magnetic Anomaly Map version 2.0, map available at <http://www.wdmam.org>.
3. Finlay, C. C., Olsen, N. and Toffner-Clausen, L., (2015) DTU candidate field models for IGRF-12 and the CHAOS-5 geomagnetic field model // Earth Planets and Space. 67. 114. doi:10.1186/s40623-015-0274-3.
4. Friis-Christensen E., Lühr H., Hulot G. (2006), Swarm: A constellation to study the Earth's magnetic field // Earth, Planets and Space. V. 58 P. 351–358.
5. M. A. Hapgood, Space physics coordinate transformations: A user guide // Planet Space Sci. 1992. V. 40. P. 711–717.
6. Love, J. J., and A. Chulliat (2013), An international network of magnetic observatories // Eos Trans. AGU. 94(42). P. 373–384. doi:10.1002/2013EO420001.
7. N. Olsen, E. Friis-Christensen, R. Floberghagen et al. (2013), The Swarm Satellite Constellation Application and Research Facility (SCARF) and Swarm data products // Earth Planets Space. 65. P. 1189–1200.
8. St-Louis B., Ed. INTERMAGNET Technical Reference Manual. Version 4.6. 2012.
9. E. Thebault et al. (2015), International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation // Earth, Planets and Space 2015. 67:79. doi:10.1186/s40623-015-0228-9.

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

Проект РФФ № 15-17-30020

Руководитель проекта г.н.с., член-корр. РАН Ал. А. Соловьев

В процессе работы над проектом сформулированы принципы единообразной системы решения проблемы распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений, т.е. системного анализа этой проблемы, инвариантного относительно выбора пороговых магнитуд землетрясений. Ранее для решения этой задачи в сейсмоактивных регионах земного шара была создана алгоритмическая система определения высокосейсмичных зон, получившая название FCAZ (Fuzzy Clustering And Zoning). Ее описание может быть найдено, например, в [Гвишиани и др., 2013]. Система была успешно применена для распознавания мест возможного возникновения эпицентров сильных ( $M \geq M_0$ ) землетрясений в двух различных горных странах: в Калифорнии ( $M_0=6,5$ ) и на Кавказе ( $M_0=5$ ). В рамках работ по проекту созданы новые блоки во входящих во FCAZ алгоритмах (DPS (Discrete Perfect Sets) и  $E^2XT$ ), которые позволяют автоматизировать выбор оптимальных значений свободных параметров алгоритмов, образующих FCAZ. Это можно интерпретировать как включение во FCAZ элементов искусственного интеллекта. Таким образом, создана продвинутая версия системы FCAZ, обладающая большей степенью формализованности и воспроизводимости, получившая название FCAZm. Апробация системы FCAZm была выполнена путем распознавания мест возможного возникновения эпицентров сильнейших землетрясений ( $M_0=7,75$ ) в горном поясе Анд Южной Америки и нового, независимого от [Гвишиани и др., 2013] распознавания мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений ( $M_0=5$ ) на Кавказе. Сопоставление нового результата с полученным ранее для Кавказа показало их хорошую согласованность. Существенно расширены и продвинуты контрольные эксперименты типа «сейсмической истории» для оценки достоверности результатов распознавания. Впервые выполнены эксперименты «полной сейсмической истории», которые дали хорошие результаты. Последовательность распознавания зон возможного возникновения сильных землетрясений системой FCAZm показана на схеме, представленной на рис. 18.1. На рис. 18.2 показан результат применения системы FCAZm к Кавказу. Созданная система FCAZm относится к методологии перспективного системного анализа, поскольку в результате ее применения высокосейсмичные зоны определяются четко и однозначно как части объемлющего их целого и отделяются от нечеткого дополнения однозначно определенной и воспроизводимой границей. Система FCAZm, как и предыдущая версия FCAZ, обладает другим характерным свойством системного анализа – инвариантностью по отношению к масштабам изучаемых подобных явлений. Иными словами, метод адаптируется, «настраивается» под данную «степень подобия» изучаемой системы.

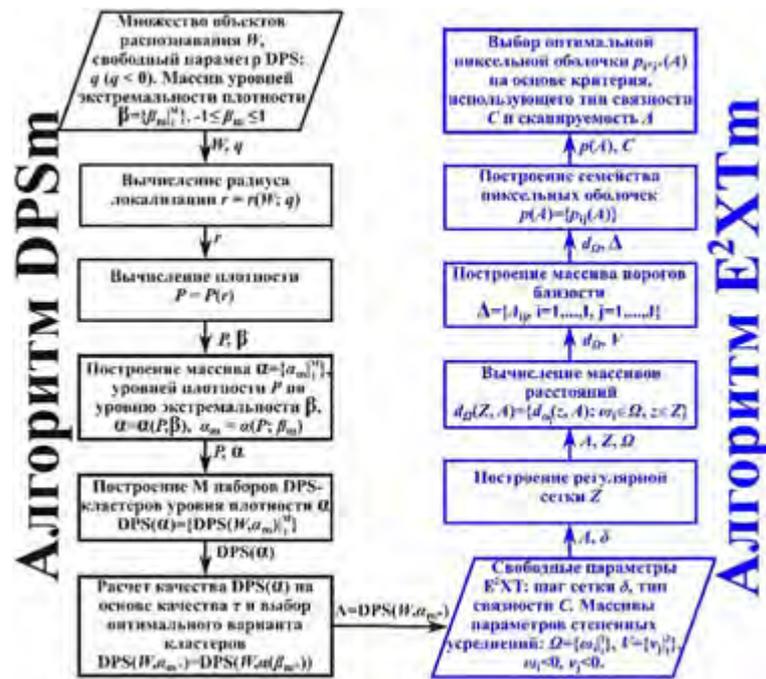


Рисунок 18.1. Блок-схема алгоритмической системы FCAZm

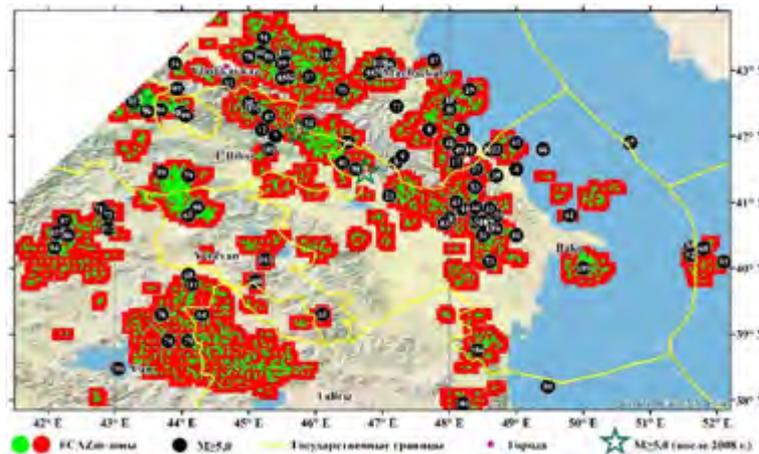


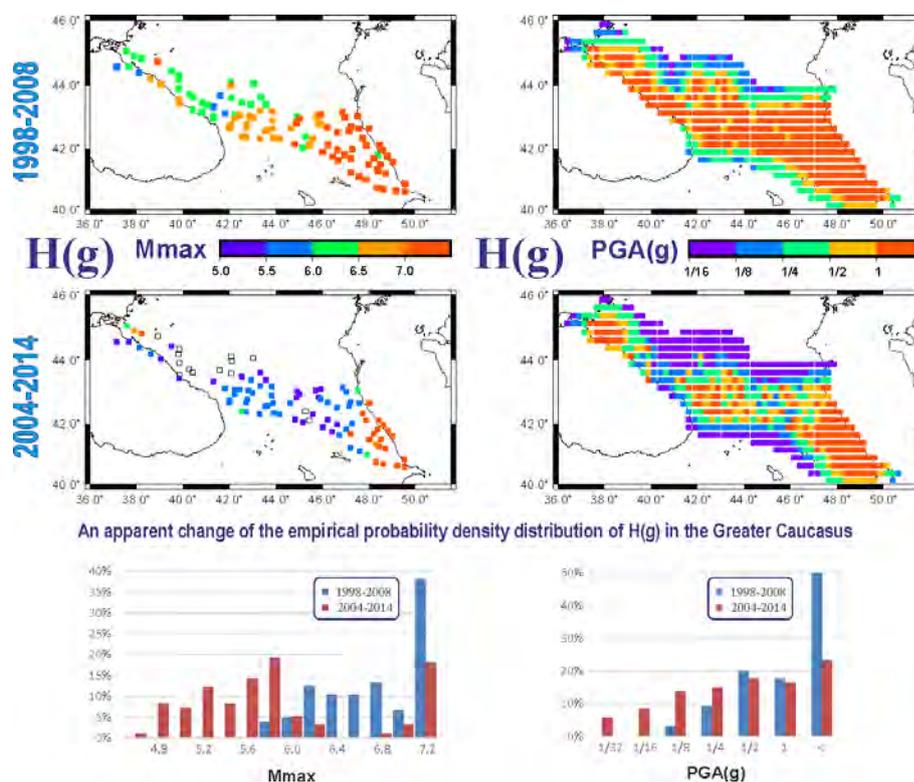
Рисунок 18.2 – Зоны возможного возникновения эпицентров землетрясений с  $M \geq 5$  на Кавказе, распознанные системой FCAZm, и эпицентры землетрясений с  $M \geq 5$

Выполнен анализ относящихся к территории Кавказа и Крыма данных из каталогов землетрясений, опубликованных в книге «Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г.», сборников «Землетрясения в СССР», «Землетрясения Северной Евразии», «Землетрясения России», а также Интернет ресурсов ANNS (Advanced National Seismic System) Северо-калифорнийского центра данных и ISC On-line Bulletin Международного сейсмологического центра. Этот анализ позволил сделать вывод о полноте и согласованности сейсмологической информации на территории Кавказа и Крыма. Принято решение об использовании в дальнейшей работе объединенного каталога территории по материалам «Землетрясения Северной Евразии в 1994–2004 гг.» и «Землетрясения России в 2004–2014 гг.». Анализ распределения событий по магнитудам показал, что график повторяемости в регионах с высокой точностью

аппроксимируется формулой  $\log_{10}(N(M)) = -0,13M^2 + 0,054M + 2,75$  для Крыма и формулой  $\log_{10}(N(M)) = -0,28M^2 + 1,25M + 2,53$  для Северного Кавказа. В приведенных формулах  $N(M)$  обозначает число землетрясений с магнитудой  $M$  и выше, которые произошли в течение 1998–2008 гг. Представительность событий с магнитудой от 2 и выше в каталоге оказалась достаточно высокой, что позволило использовать такие события для расчета коэффициентов Общего закона подобия для землетрясений (ОЗПЗ).

ОЗПЗ [Кособоков, Некрасова, 2004] учитывает 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  $L$ :  $\log_{10} N(M, L) = A + B \cdot (5 - M) + C \cdot \log_{10} L$ , 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  $L_0 \times L_0$ . Расчет параметров ОЗПЗ на территории Крыма и Северного Кавказа проводился в пересечениях морфоструктурных линеаментов с использованием иерархии квадратных ячеек со стороной от 0,25 до 2 градусов земного меридиана. Содержательные оценки коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$  получены для всех 105 пересечений Северного Кавказа и для 11 из 15 пересечений Крыма, где число зарегистрированных в 1998–2008 гг. землетрясений оказалось достаточным для надежного использования алгоритма. Построены карты оценок параметров  $A$ ,  $B$  и  $C$ , а также графики плотности их распределения и ошибки определения их значений.

На основе оценок коэффициентов ОЗПЗ на территории Крыма и Северного Кавказа построены карты сейсмической опасности в терминах максимальной магнитуды и пикового ускорения на скальном грунте, ожидаемых с вероятностью 10% в период продолжительностью 50 лет. Карты для Большого Кавказа по данным за 1998–2008 и 2004–2014 гг. представлены в докладе на Осеннем собрании Американского геофизического союза 2015 г. и показаны на рис. 18.3. Обнаружена высокая степень изменчивости сейсмической опасности в среднесрочном масштабе времени, что подтверждает следующий вывод: оценки сейсмической опасности для строительных норм и правил не должны полагаться исключительно на данные об инструментальных землетрясениях и дополнительно требуют неопределенных подходов, основанных на надежных геологических данных и результатах применения проблемно-ориентированных методов распознавания образов.



**Рисунок 18.3 – Карты сейсмической опасности в терминах максимальной магнитуды и пикового ускорения на скальном грунте, ожидаемых с вероятностью 10% в период продолжительностью 50 лет, для Большого Кавказа по данным за 1998–2008 и 2004–2014 гг.**

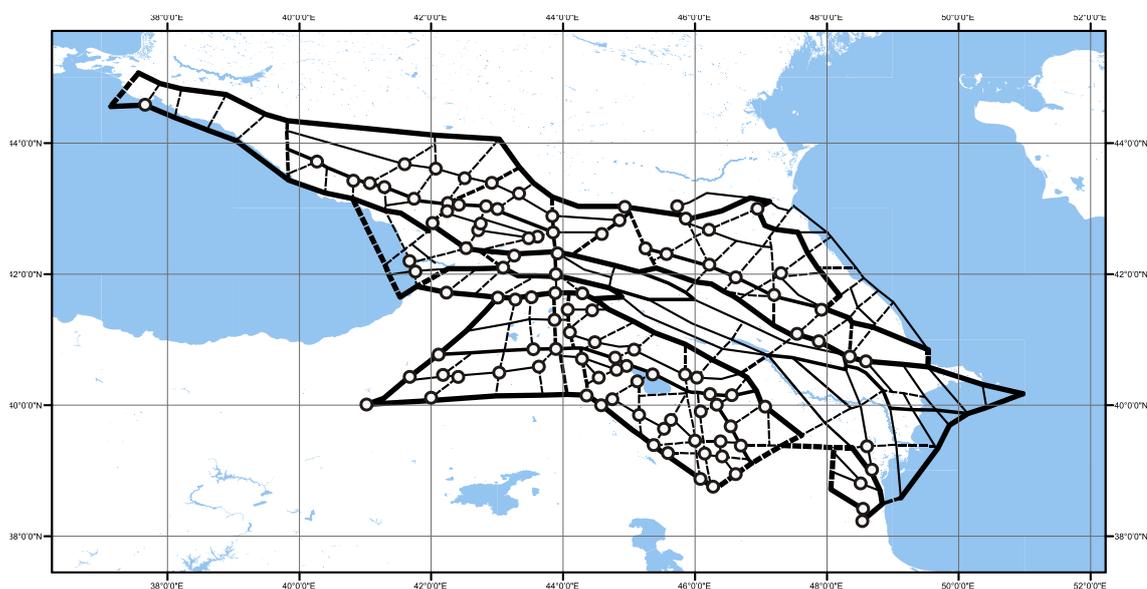
Данные по литосферным аномалиям магнитного поля Земли впервые использованы при решении задачи определения мест возможного возникновения сильных землетрясений с помощью алгоритмов распознавания образов. Подход к решению этой задачи основывается на гипотезе о том, что эпицентры достаточно сильных землетрясений (с магнитудой  $M \geq M_0$ ) приурочены к местам пересечений морфоструктурных линеаментов, которые являются границами блоков земной коры [Гельфанд и др., 1972], выделенными с помощью специальной методики морфоструктурного районирования – МСР, описанной, например, в [Горшков, 2010]. Эта гипотеза подтверждается для многих регионов путем применения приведенного в [Гвишиани, Соловьев, 1981] метода анализа взаимного расположения эпицентров и пересечений морфоструктурных линеаментов. Задача состоит в определении опасных (в окрестностях которых возможны сильные землетрясения) пересечений региона путем формулировки критериев, по которым они отличаются от остальных пересечений, на основе геолого-геофизической информации о них. Эта задача решается методами распознавания образов с использованием алгоритмов с обучением, в частности, алгоритма Кора-3, описание которого может быть найдено в [Горшков, 2010]. Каждому пересечению (объекту распознавания) ставится в соответствие вектор геолого-геофизических характеристик, которые однотипно определены для всех пересечений рассматриваемого региона. Для проверки целесообразности использования геомагнитных данных был рассмотрен регион Кавказа с пороговым значением магнитуды сильных землетрясений  $M_0=6$ . Для этого региона ранее методом морфоструктурного

районирования (МСР) была построена схема морфоструктурных линеаментов и решена аналогичная задача без использования геомагнитных данных [Соловьев и др., 2013]. В качестве исходной информации о магнитных аномалиях в регионе использовалась компиляция данных, недавно подготовленная в рамках международного научного проекта «Мировая цифровая карта магнитных аномалий» (WDMAM – World Digital Magnetic Anomaly Map) [Dyment et al., 2015]. В 2007 г. была выпущена первая версия карты [Korhonen et al., 2007; Соловьев и др., 2012]. С 2010 г. была начата подготовка второй версии, которая после независимой международной экспертизы и внесения исправлений была официально одобрена и анонсирована как WDMAM версии 2.0 на Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики в Праге в июне 2015 г. В настоящей работе из всего массива WDMAM 2.0 отбирались данные, входящие в круговые окрестности радиуса 25 км всех пересечений морфоструктурных линеаментов Кавказа. Для каждой окрестности были рассчитаны максимальное ( $M_{max}$ ) и минимальное ( $M_{min}$ ) значения магнитной аномалии и разность между максимальным и минимальным значениями ( $DM$ ). Предварительный анализ геомагнитных характеристик показал их очевидную информативность по отношению к рассматриваемой задаче. Это было подтверждено применением алгоритма Кора-3 для классификации объектов распознавания, к описанию которых были добавлены геомагнитные характеристики, на опасные и неопасные. Геомагнитные характеристики вошли в большинство отобранных алгоритмом характерных признаков, на основании которых формулируется решающее правило для классификации. На рис. 18.4 показан полученный результат классификации пересечений Кавказа с использованием геомагнитных характеристик. Анализ характерных признаков показывает, что опасные пересечения характеризуются большими значениями  $M_{max}$ , малыми значениями  $M_{min}$  и большими значениями  $DM$ . Для неопасных пересечений характерны малые значения  $M_{max}$  и  $DM$ . Это говорит о том, что в окрестностях опасных пересечений литосферные аномалии магнитного поля Земли более неоднородны, чем в окрестностях неопасных пересечений, что может быть связано с более неоднородным строением литосферы в высокосейсмичных областях.

Таким образом, данные по литосферным магнитным аномалиям являются информативными с точки зрения определения мест возможного возникновения сильных землетрясений и перспективно их использование при решении подобных задач для различных сейсмоактивных регионов.

Изучена территория Горного Крыма и Керченского полуострова, которые характеризуются наиболее высокой сейсмической активностью в Крымском регионе. Выполнено морфоструктурное районирование (МСР) этих территорий с целью определения сейсмоконтролирующих узлов для их последующей классификации методами распознавания образов на высоко- и низкосейсмичные. Полученная схема МСР представлена на рис. 18.5. Исходными данными для ее составления послужили топографические и геологические карты в масштабах 1:500 000–1:1 000 000, а также космические снимки и литературные данные. Схема МСР отображает иерархическую блоковую структуру региона и местоположение морфоструктурных узлов, которые формируются в местах пересечения морфоструктурных линеаментов, ограничивающих блоки. В изученном регионе выделено две территориальных единицы высшего (первого

ранга). Это Горный Крым, представленный в рельефе сочетанием горных хребтов и плато и Керченский полуостров, где невысокие холмы сочетаются с равнинами. Горные страны разделены на мегаблоки – территориальные единицы второго ранга. В пределах Горного Крыма выделено 4 мегаблока (рис. 18.5). Мегаблоки I и II включают протяженные отрезки Крымского хребта, которые различаются уровнем высот и простиранием горного хребта. В мегаблоке I высота хребта составляет 1 300–1 500 м, а его ось ориентирована в северо-западном простирании. В мегаблоке II высота хребта резко снижается и составляет 800–900 м при его ВСВ ориентации, переходящей в близширотную. Мегаблоки III и IV выделены в пределах морского шельфа, расположенного между Крымским хребтом и континентальным склоном, обрамляющим глубоководную Черноморскую впадину. Линеаменты первого ранга отделяют Горный Крым от прилегающих территорий другого геологического генезиса и облика рельефа. На севере линеамент 1-го ранга 1-26 отделяет альпийские структуры Горного Крыма от равнинных территорий Скифской плиты герцинского возраста. На юге линеамент 1-го ранга 1-28 отделяет Горный Крым от глубоководной Черноморской впадины. На востоке линеамент 1-го ранга 28-29 отделяет Горный Крым от всхолмленных равнин Керченского полуострова. Линеаменты 3-го ранга в пределах Горного Крыма контролируют резкие изменения в высоте и простирании горного хребта. Они трассируются вдоль прямолинейных участков речных долин и крутых уступов в хребтах. В пределах Керченского полуострова линеаменты 3-го ранга контролируют изменения в простирании мелких форм рельефа.



**Рисунок 18.4 – Схема линеаментов Кавказа и пересечения линеаментов, отнесенные к опасным с использованием геомагнитных характеристик. Толщина линий соответствует рангу линеаментов: самые толстые – первый ранг; средней толщины – второй ранг; тонкие – третий ранг. Сплошными линиями показаны продольные линеаменты, пунктирными – поперечные. Кругами отмечены пересечения, отнесенные к опасным**



**Рисунок 18.5 – Схема морфоструктурного районирования горного Крыма и Керченского полуострова. Толстыми линиями показаны линеаменты первого ранга, средними – второго ранга, тонкими – третьего ранга. Сплошные линии – продольные линеаменты, прерывистые – поперечные. Римскими цифрами обозначены номера мегаблоков, арабскими – номера пересечений линеаментов**

На схеме МСР выделено 35 пересечений морфоструктурных линеаментов, которые на следующем этапе составят множество объектов для решения задачи распознавания высоко- и низкосейсмичных пересечений на территории Горного Крыма и Керченского полуострова. Измерены геолого-геофизические и геоморфологические характеристики объектов распознавания.

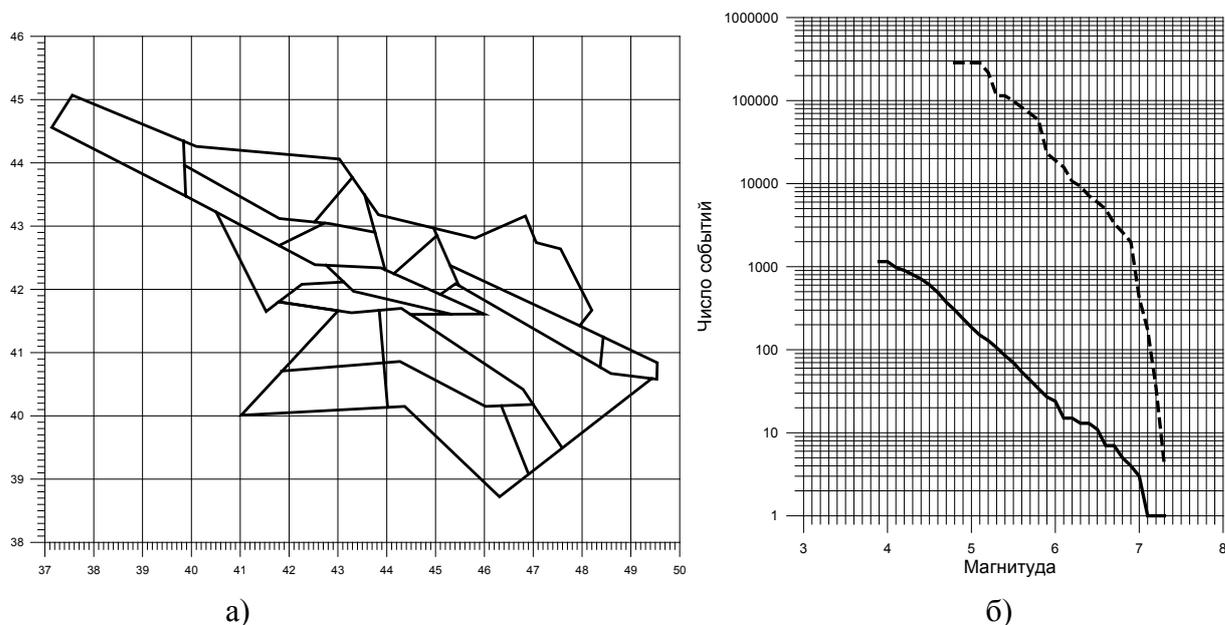
На основе схемы морфоструктурного районирования разработана реалистичная модель системы разломов и блоков Кавказа и выполнен ряд численных экспериментов по моделированию ее динамики и сейсмичности. Модель динамики системы блоков и разломов (блоковая модель) разработана для анализа зависимости основных свойств сейсмичности от структуры литосферы в рассматриваемом регионе и особенностей ее динамики. Литосфера региона представляется в виде системы абсолютно жестких блоков, разделенных бесконечно тонкими плоскостями разломов. Задается вязкоупругое взаимодействие блоков между собой и с подстилающей средой. Смещения и повороты блоков в каждый момент времени вычисляются таким образом, чтобы вся система блоков находилась в состоянии квазистатического равновесия. Когда в какой-либо части разлома отношение напряжения к давлению превосходит заданный порог, возникает разрыв, который рассматривается в модели как землетрясение. Подробное описание принципов моделирования может быть найдено в [Ismail-Zadeh et al., 2007; Соловьев, 2011]. В качестве основы для построения блоковой структуры Кавказа была взята схема морфоструктурного районирования, представленная на рис. 18.4. Построенная блоковая

структура показана на рис. 18.6а. Численные эксперименты по моделированию ее динамики проводились для различных вариантов задания движения на границах структуры, наклонов разломов, разделяющих блоки, параметров, определяющих свойства разломом и т.п. На рис. 18.6б показан график частотно-магнитудной зависимости для землетрясений, полученных в модели в одном из численных экспериментов, в сравнении с аналогичным графиком для реальной сейсмичности Кавказа. Сравнение графиков показывает, что они имеют близкие наклоны. График для синтетических землетрясений, полученных в модели, расположен существенно выше, т.к. интервал моделирования соответствует интервалу времени, значительно превосходящему период инструментальных наблюдений, покрытый каталогом землетрясений Кавказа.

В рамках создания автоматизированной системы для измерения геолого-геофизических и геоморфологических характеристик объектов распознавания был разработан инструмент геообработки для ГИС-системы компании Esri – ArcGIS. Инструмент реализован на языке Python с использованием специальной библиотеки ArcPy. Разработанная программа включает в себя следующие этапы:

- чтение входных параметров (карта, радиус, набор координат объектов распознавания);
- преобразование набора координат и карты в shapefile для удобства работы в среде ArcGIS;
- построение круга для каждого из заданных объектов распознавания: вычисляются расстояния между объектом и точками карты (определение расстояний между двумя точками с помощью метода «Вычисление длины большого круга»), отбираются расстояния, которые меньше или равны заданному радиусу, фиксируются номера точек карты, которые попадают в круг;
- считывание требуемых данных, относящихся к точкам карты, с номерами, определенными на предыдущем этапе;
- определение требуемой характеристики объекта распознавания.

Основными достоинствами инструмента являются: автоматизация процесса, который раньше выполнялся вручную, большая точность вычислений, удобство работы с цифровыми картами формата ГИС. Инструмент был опробован для измерения геолого-геофизических и геоморфологических характеристик объектов Кавказа и Крыма.



**Рисунок 18.6 – (а) Модель блоковой структуры Кавказа, построенная на основе схемы морфоструктурного районирования (по горизонтальной оси показаны градусы восточной долготы, по вертикальной оси – градусы северной широты); (б) Кумулятивные графики частотно-магнитудной зависимости для землетрясений, полученные в одном из численных экспериментов в модели (пунктирная линия) и для реальной сейсмичности Кавказа (сплошная линия)**

### Список использованных источников

1. Гвишиани А. Д., Дзедзедзе Б. А., Агаян С. М. О новом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе // Физика Земли. 2013. № 6. С. 3–19.
2. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е. Я. О критериях высокой сейсмичности // Доклады АН СССР. 1972. Т. 202. № 6. С. 1317–1320.
3. Гвишиани А. Д., Соловьев А. А. О приуроченности эпицентров сильных землетрясений к пересечениям морфоструктурных линейных элементов на территории Южной Америки // Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. и Левшина А. Л. М.: Наука, 1981. С. 46–50 (Вычислительная сейсмология. Вып. 13).
4. Горшков А. И. Распознавание мест сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском поясе. М.: КРАСАНД, 2010. 472 с. (Вычислительная сейсмология. Вып. 40).
5. 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 (Вычислительная сейсмология. Вып. 35).
6. 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.
7. 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.
8. Соловьев А. А., Хохлов А. В., Жалковский Е. А., Березко А. Е., Лебедев А. Ю., Харин Е. П., Шестопапов И. П., Мандеа М., Кузнецов В. Д., Бондарь Т. Н., Нечитайленко В. А.,

- Рыбкина А. И., Пятыгина О. О., Шибаета А. А.** (2012) Атлас магнитного поля Земли (под ред. **А. Д. Гвишиани**, А. В. Фролова, В. Б. Лапшина). Публ. ГЦ РАН, Москва, 364 с.
9. Dyment J., Lesur V., Hamoudi M., Choi Y., Thebault E., Catalan M., the WDMAM Task Force, the WDMAM Evaluators, and the WDMAM Data Providers (2015) World Digital Magnetic Anomaly Map version 2.0, map available at <http://www.wdmam.org>.
  10. Ismail-Zadeh A., Le Mouél J.-L., **Soloviev A.**, Tapponnier P. and Vorobieva I. Numerical modeling of crustal block-and-fault dynamics, earthquakes and slip rates in the Tibet-Himalayan region. *EPSL*, 2007, 258, 3-4: 465–485.
  11. Korhonen J. V. et al. (2007), Magnetic Anomaly Map of the World, Scale: 1:50,000,000, 1st ed., Commission for the Geological Map of the World (Paris, France).

## 19. Международная деятельность ГЦ РАН

В 26-й Генеральной ассамблее IUGG в г. Праге (Чехия) приняли участие 10 делегатов от ГЦ РАН, которые представили 20 докладов (12 устных, 8 стендовых).



### Избранные заграничные командировки сотрудников ГЦ РАН в 2015 г.:

Франция, Париж, CODATA, Парижский институт физики Земли – 4 чел.;

Финляндия, Хельсинки (МИД), Университет г. Оулу, г. Соданкюля, Геофизическая обсерватория – 2 чел.;

Армения, г. Ереван, международная конференция – 1 чел.;

Чехия, Прага, летняя школа для молодых ученых IAGA, 26-я Генеральная ассамблея IUGG – 10 чел.;

Монако, Музей океанографии – 2 чел.;

Австрия, г. Лаксенбург, Международный институт прикладного системного анализа, Международная конференция «Systems Analysis 2015» – 3 чел.;



Япония, г. Токио, Национальный институт информационных и коммуникационных технологий – 1 чел.;

Германия, г. Берлин, Международная конференция по геодинамике и тектонике плит «GeoBerlin 2015» – 1 чел.;

Италия, г. Фраскати, ESRIN – 1 чел.;

Китай, г. Йаксинг, проведение переговоров о сотрудничестве – 2 чел.

### **Участие в организации международных конференций:**

Геофизическим центром РАН совместно с Майкопским государственным технологическим университетом, Институтом физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН и Институтом океанологии им. П. П. Ширшова РАН при участии Управления по охране окружающей среды, природным ресурсам и чрезвычайным ситуациям Республики Адыгея 11–14 мая 2015 г. в г. Майкопе (Республика Адыгея) проведена III Международная научно-практическая конференция «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». В работе конференции приняли участие ученые России, Абхазии, Украины, Ливана, Германии и Австрии. На пленарном и секционных заседаниях было представлено 36 докладов. В рамках конференции проведены лекции «Школы молодых учёных».



### **Посещение ГЦ РАН зарубежными коллегами в 2015 г.:**

Директор Океанографического музея Монако Роберт Калканьо в рамках официального визита в Москву (май 2015 г., Сектор инновационных проектов);

Делегация китайской компании “Xian Mantle & Gas Exploration and Research Co. Ltd” (июнь 2015 г., лаборатория геодинамики);

Специалист NOAA по геомагнитным и ионозондным данным Джастин Мэйби (сентябрь 2015 г., лаборатория геоинформатики и геомагнитных исследований).

### **Членство сотрудников ГЦ РАН в российских и международных комитетах, инициированное в 2015 г.:**

Гвишиани А. Д. – вице-председатель секции по международным делам НКС ФАНО, вице-председатель научного совета IASA;

Соловьев А. А. – совет по формированию единой системы информационного обеспечения научных исследований при ФАНО, председатель Межведомственной комиссии по истории IAGA, заместитель председателя Национального комитета CODATA РАН;

Лукьянова Р. Ю. – исполнительный комитет IAGA;

Красноперов Р. И. – секция по международным делам НКС ФАНО;

Рыбкина А. И. – ученый секретарь Национального комитета CODATA РАН.

### **Соглашения о научно-техническом сотрудничестве, заключенные в 2015 г.:**

Соглашение о сотрудничестве между Геофизическим центром РАН и НИТУ «МИСиС»;

Договор об образовании НОЦ между ГЦ РАН и кафедрой горно-промышленной экологии НИТУ «МИСиС»;

Договор об образовании НОЦ между ГЦ РАН и ФГБОУ ВПО МИИГАиК;

Меморандум о взаимопонимании с ООО «Технологическая компания Шлюмберже»;

Соглашение о сотрудничестве с ФГБОУ ВО Майкопским государственным технологическим университетом.

## Список публикаций за 2015 год

### Монографии

1. **Кафтан В. И.** [и др.] Энциклопедия кадастрового инженера. Учебное пособие / Под. общ. ред. М. И. Петрушиной, А. Г. Овчинниковой. - М.: Кадастр недвижимости, 2015. 704 с., 173 ил.

### Статьи в журналах и сборниках

1. **Алешин И. М.**, Алпатов В. В., Васильев А. Е., Бургучев С. С., Холодков К. И., Передерин Ф. В. Опыт создания оперативной службы сбора данных сети наземных станций глобальных навигационных спутниковых систем // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 1(25). С. 99–103.
2. **Aleshin I. M.**, Vasiliev A. E., Kholodkov K. I., Perederin F. V. Virtual private network technologies in real-time geophysical data collection systems // Seismic Instruments. 2015. Vol. 51. № 1. P. 44–47.
3. Алешин В. П., Афанасьев В. О., **Бобков А. Е.**, Клименко А. С., Клименко С. В., Новгородцев Д. Д., Ротков С. И., Сандлер А. Д. Особенности формирования изображений статических и динамических 3d-сцен в системах виртуального окружения // Приволжский научный журнал. 2015. № 1 (33). С. 84–92.
4. **Бобков А. Е.**, Леонов А. В. Процедурная реконструкция территорий на виртуальном глобусе // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 11 (137). С. 10–17.
5. **Богоутдинов Ш. Р.**, Шустер В. Л., **Агаян С. М.**, Цаган-Манджиев Т. Н., **Кафтан В. И.** Оценка перспектив нефтегазоносности фундамента в центральной части Западной Сибири с применением алгоритмов нечеткой логики и системного анализа // Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле» (International scientific, technical and industrial electronic journal «Geo Science»). 2015. № 2. С. 5–30.
6. **Гвишиани А. Д.**, **Лукьянова Р. Ю.** Геоинформатика и наблюдения магнитного поля земли: российский сегмент // Физика Земли. 2015. № 2. С. 3–20. DOI: 10.7868/S0002333715020040 (**Gvishiani A. D.**, **Lukianova R. Yu.** Geoinformatics and observations of the Earth's magnetic field: The Russian segment // Izvestiya-Physics of the Solid Earth. 2015. Vol. 51. Issue 2. P. 157–175. DOI: 10.1134/S1069351315020044).
7. **Гвишиани А. Д.**, Старостенко В. И., Сумарук Ю. П., **Соловьев А. А.**, Легостаева О. В. Уменьшение солнечной и геомагнитной активности с 19-го по 24-й цикл // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015. Т. 55. № 3. С. 314–322. DOI: 10.7868/S0016794015030098 (**Gvishiani A. D.**, Starostenko V. I., Sumaruk Y. P., **Soloviev A. A.**, Legostaeva O. V. A decrease in solar and geomagnetic activity from cycle 19 to cycle 24 // Geomagnetism and Aeronomy. 2015. Vol. 55. No 3. P. 299–306. DOI: 10.1134/S0016793215030093).
8. **Гвишиани А. Д.**, **Татаринов В. Н.** Геологическая среда и проблема обеспечения безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов // Горный журнал. 2015. № 10. С. 4–5.
9. **Гвишиани А. Д.**, **Дзедобоев Б. А.** Оценка сейсмической опасности при выборе мест захоронения радиоактивных отходов // Горный журнал. 2015. № 10. С.39–43. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.07.
10. **Гвишиани А. Д.**, **Лукьянова Р. Ю.**, **Соловьев А. А.** Исследование геомагнитного поля и проблемы точности бурения наклонно направленных скважин в Арктическом регионе // Горный журнал. 2015. № 10. С.94–99. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.17. (**Gvishiani A. D.**, **Lukianova R. Yu.**, **Soloviev A. A.** Geomagnetic field analysis and directional drilling problem in the Arctic region // Gornyi Zhurnal (Mining Journal). 2015. № 10. P. 94–99. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.17).
11. **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.

12. **Гетманов В. Г.**, Борзунов Г. И. Алгоритм параллельных вычислений для задачи спектрально-временного анализа на базисных полигармонических функциях // Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 6. С. 456–463.
13. Горбатиков А. В., Рогожин Е. А., Степанова М. Ю., Харазова Ю. В., Андреева Н. В., Передерин Ф. В., Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Дзеранов Б. В., **Дзебоев Б. А.**, Габараев А. Ф. Особенности глубинного строения и современной тектоники Большого Кавказа в осетинском секторе по комплексу геофизических данных // Физика Земли. 2015. № 1. С. 28–39. DOI: 10.7868/S000233371501007X (Gorbatikov A. V., Rogozhin E. A., Stepanova M. Yu., Kharazova Yu. V., Andreeva N. V., Perederin F. V., Zaalishvili V. B., Mel'kov D. A., Dzeranov B. V., **Dzeboev B. A.**, Gabaraev A. F. The pattern of deep structure and recent tectonics of the Greater Caucasus in the Ossetian sector from the complex geophysical data // *Izvestiya Physics of the Solid Earth*. 2015. Vol. 51. Issue 1. P. 26–37. DOI: 10.1134/S1069351315010073).
14. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., **Дзебоев Б. А.** Использование вейвлет-анализа при обработке сейсмологических данных // Труды молодых ученых Владикавказского научного центра РАН. 2015. Т. 15. № 1. С. 110–115.
15. Заалишвили В. Б., Джгамадзе А. К., Мельков Д. А., Дзеранов Б. В., Габараев А. Ф., Габеева И. Л., **Дзебоев Б. А.**, Кануков А. С., Шепелев В. Д. Уточнение инженерно-геологических условий территории с помощью микросейсм (на примере населенных пунктов Республики Северная Осетия-Алания) // Геология и геофизика Юга России. 2015. № 1. С. 5–20.
16. Логачёв Ю. И., Базилевская Г. А., Вашенюк Э. В., Дайбог Е. И., **Ишков В. Н.**, Лазутин Л. Л., Мирошниченко Л. И., Назарова М. Н., Петренко И. Е., Ступишин А. Г., Сулова Г. М., Яковчук О. С. Сравнение протонной активности в 20–23 циклах солнечной активности // Геомagnetизм и аэрономия. 2015. № 2. С. 291–301. DOI: 10.7868/S001679401503013X. (Logachev, Yu. I., Bazilevskaya G. A., Vashenyuk E. V., Daibog E. I., **Ishkov V. N.**, Lazutin L. L., Miroshnichenko L. I., Nazarova M. N., Petrenko I. E., Stupishin A. G., Surova G. M., Yakovchouk O. S. A comparison of proton activity in cycles 20–23 // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015. Vol. 55. Issue 3. P. 277–286. DOI: 10.1134/S0016793215030135).
17. Базилевская Г. А., Логачёв Ю. И., Вашенюк Э. В., Дайбог Е. И., **Ишков В. Н.**, Лазутин Л. Л., Мирошниченко Л. И., Назарова М. Н., Петренко И. Е., Сулова Г. М., Яковчук О. С. Солнечные протонные события в циклах солнечной активности 21–24 // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 5. С. 627–630. DOI: 10.7868/S0367676515050142. (Bazilevskaya G. A., Logachev Yu. I., Vashenyuk E. V., Daibog E. I., **Ishkov V. N.**, Lazutin L. L., Miroshnichenko L. I., Nazarova M. N., Petrenko I. E., Surova G. M., Yakovchouk O. S. Solar proton events in solar activity cycles 21–24 // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. Vol. 79. Issue 5. P. 573–576. DOI: 10.3103/S1062873815050135).
18. **Ишков В. Н.** Солнце в октябре–ноябре 2014 г. // Земля и Вселенная. РАН. Наука. 2015. № 1. С. 22–26.
19. **Ишков В. Н.** Солнце в декабре 2014 г.– январе 2015 г. // Земля и Вселенная. 2015. № 3. С. 32–35.
20. **Ишков В. Н.** Солнце в феврале–марте 2015 г. // Земля и Вселенная. 2015. № 4. С. 30–33.
21. **Ishkov V. N.** Solar flare super-events: when they can occur and the energy limits of their realization // *Sun and Geosphere*. 2015. V. 10. P. 89–96. ISSN 1819-0839. [http://newserver.stil.bas.bg/SUNGEO/00SGArhiv/SG\\_v10\\_No1\\_2015-pp-89-96.pdf](http://newserver.stil.bas.bg/SUNGEO/00SGArhiv/SG_v10_No1_2015-pp-89-96.pdf).
22. Chen B., **Kaban M. K.**, El Khrepy S., Al-Arifi N. Effective elastic thickness of the Arabian plate: Weak shield versus strong platform // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. P. 3298–3304. DOI: 10.1002/2015GL063725.
23. Shahraki M., Schmeling H., **Kaban M. K.**, Petrunin A. G. Effects of the postperovskite phase change on the observed geoid // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. Issue 1. P. 44–52. DOI: 10.1002/2014GL060255.

24. Tesauro M., **Kaban M. K.**, Mooney W. D. Variations of the lithospheric strength and elastic thickness in North America // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2015. Vol. 16. Issue 7. P. 2197–2220. DOI: 10.1002/2015GC005937.
25. **Кафтан В. И., Красноперов Р. И.** Геодезические наблюдения на геомагнитных обсерваториях // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2015. Т. 55. № 1. С. 123–129. (**Kaftan V. I., Krasnoperov R. I.** Geodetic observations at geomagnetic observatories // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015. Vol. 55. № 1. P. 118–123.
26. **Кафтан В. И., Красноперов Р. И.,** Тертышников А. В. Наблюдения с использованием глобальных навигационных систем на геомагнитных станциях и обсерваториях: прикладные и глобальные аспекты // *Гелиогеофизические исследования. Электронный научный журнал*. 2015. Вып. 12. С. 1–10. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=298>  
<http://vestnik.geospace.ru/php/download.php?id=UPLF7d78fb4f8c5111f9f108cdf65edc2880.pdf>.
27. **Кафтан В. И.,** Устинов А. В. Повышение точности локального геодинамического мониторинга средствами глобальных навигационных спутниковых систем // *Горный журнал*. 2015. № 10. С. 32–38. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.06.
28. **Кафтан В. И.** Национальное сообщение России за 2011–2014 годы для Международной ассоциации геодезии Международного геодезического и геофизического союза // *Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле»* (International scientific, technical and industrial electronic journal «Geo Science»). 2015. № 3. С. 5–6.
29. Савиных В. П., **Кафтан В. И.** Преамбула национального сообщения международной ассоциации геодезии международного геодезического и геофизического союза за 2011–2014 гг. // *Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле»* (International scientific, technical and industrial electronic journal «Geo Science»). 2015. № 3. С. 7–8.
30. **Кафтан В. И.,** Малкин З. М., Побединский Г. Г., Столяров И. А. Отсчетные основы // *Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле»*. (International scientific, technical and industrial electronic journal «Geo Science»). 2015. № 3. С. 9–21.
31. **Кафтан В. И.,** Сермягин Р., Зотов Л. Гравитационное поле земли // *Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле»*. (International scientific, technical and industrial electronic journal «Geo Science»). 2015. № 3. С. 22–28.
32. **Кафтан В. И.,** Горшков В. Л., Малкин З. М., Шестаков Н., Стеблов Г. Геодинамика // *Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле»*. (International scientific, technical and industrial electronic journal «Geo Science»). 2015. № 3. С. 29–43.
33. **Кафтан В. И.,** Малкин З. М. Общие и смежные проблемы геодезии // *Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле»* (International scientific, technical and industrial electronic journal «Geo Science»). 2015. № 3. С. 63–68.
34. Кедров О. К., **Кедров Э. О.** Применение спектрального метода для оценки добротности среды по землетрясениям в Центральной Азии // *Физика Земли*. 2015. № 1. С. 54–62. DOI: 10.7868/S0002333714050020. (Kedrov O. K., **Kedrov E. O.** Application of the spectral method for estimating the Q factor of the medium from the earthquakes in Central Asia // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. Vol. 51. Issue 1. P. 51–59. DOI: 10.1134/S1069351314050024).
35. **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.
36. **Красноперов Р. И., Сидоров Р. В., Соловьев А. А.** Современные геодезические методы высокоточной привязки геофизических съемок на примере магниторазведки // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2015. Т. 55. № 4. С. 568–576. DOI: 10.7868/S0016794015040070. (**Krasnoperov R. I., Sidorov R. V., Soloviev A. A.** Modern geodetic methods for high-accuracy survey coordination on

- the example of magnetic exploration // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015. Vol. 55. No 4. P. 547–554. DOI: 10.1134/S0016793215040076).
37. **Кудашин А. С.** Создание в СССР мирового центра данных по планетарной геофизике (1957–1960 гг.) // *Вопросы истории естествознания и техники*. 2015. Т. 36. № 2. С. 368–376.
  38. **Костяной А. Г., Лебедев С. А., Семенов А. В.** О необходимости спутникового мониторинга трансграничных вод России // *Проблемы постсоветского пространства*. 2015. № 2 (4). С. 18–33.
  39. **Лебедев С. А.** Динамика Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 4. С. 72–85.
  40. **Mursula K., Lukianova R., Holappa L.** Occurrence of high-speed solar wind streams over the Grand Modern Maximum // *Astrophysical Journal*. 2015. Vol. 801. Issue 1. Article Number: 30. DOI: 10.1088/0004-637X/801/1/30.
  41. **Lukianova R., Kozlovsky A., Ulich T., Shalimov S., Lester M.** Thermal and dynamical perturbations in the winter polar mesosphere-lower thermosphere region associated with sudden stratospheric warmings under conditions of low solar activity // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2015. Vol. 120. Issue 6. P. 5226–5240. DOI: 10.1002/2015JA021269.
  42. **Uvarov V. M., Lukianova R. Y.** Numerical modeling of the polar F region ionosphere taking into account the solar wind conditions // *Advances in Space Research*. 2015. Vol. 56. Issue 11. P. 2563–2574. DOI: 10.1016/j.asr.2015.10.004.
  43. **Lushnikov A. A.** Source-enhanced coalescence of trees in a random forest // *Physical Review E*. 2015. Issue 92. Article number 022135. DOI: 10.1103/PhysRevE.92.022135.
  44. **Leyvraz F., Lushnikov A. A.** Scaling anomalies in the sol–gel transition // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. 2015. Vol. 48. No. 20. Article number 205002. DOI: 10.1088/1751-8113/48/20/205002.
  45. **Lushnikov A. A.** Exactly solvable model of a coalescing random graph // *Physical Review E*. 2015. Issue 91. Article number 022119. DOI: 10.1103/PhysRevE.91.022119.
  46. **Лушников А. А., Загайнов В. А., Любовцева Ю. С.** Механизмы происхождения нанометровых аэрозолей // *Химическая физика*. 2015. Т. 34. № 10. С. 51–63. DOI: 10.7868/S0207401X1510009X. (**Lushnikov A. A., Zagaynov V. A., Lyubovtseva Y. S.** Mechanism of the formation of tropospheric nanoaerosols // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2015. Vol. 9. Issue 5. P. 796–806. DOI: 10.1134/S199079311505022X).
  47. **Lushnikov A. A., Kagan A. S.** Linear dynamics of population // *International Journal of Modern Physics, B*. 2015. Online Ready. DOI: 10.1142/S0217979215410088.
  48. **Морозов В. Н., Каган А. И.** К прогнозу устойчивости приствольных зон скважин, содержащих контейнеры с радиоактивными отходами // *Горный журнал*. 2015. № 10. С. 64–66. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.12.
  49. **Морозов В. Н., Каган А. И., Татаринев В. Н.** Геодинамические аспекты радиационной безопасности на архипелаге Новая Земля // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № 9. С. 205–219.
  50. **Родкин М. В., Нго Т. Л., Лабунцова Л. М.** Расширение модели мультипликативного каскада для описания режима повторяемости сильнейших землетрясений применительно к региональной сейсмичности Юго-восточной Азии // *Геофизические исследования*. 2015. Т. 16. № 2. С. 58–68.
  51. **Родников А. Г., Забаринская Л. П., Пийп В. Б., Сергеева Н. А., Нисилевич М. В.** Геодинамика осадочных бассейнов пассивных континентальных окраин Арктики // *Труды 47 Тектонического совещания «Тектоника и геодинамика континентальной и океанической литосферы: общие и региональные аспекты»*. Том 2. М.: ГЕОС, 2015. С. 112–117.

52. **Рыбкина А. И., Бобков А. Е., Никифоров О. Е., Пятыгина О. О.** Программно-аппаратный комплекс для визуализации геофизических данных на сферическом экране // Научная визуализация. 2015. Т.7. № 2. С. 38–49.
53. **Rybkina A. I., Kern A. K., Rostovtseva Y. V.** New evidence of the age of the Lower Maecotian substage of the Eastern Paratethys based on astronomical cycles // *Sedimentary Geology*. 2015. Vol. 330. P. 122–131. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2015.10.003.
54. **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.
55. **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 Klimovskaya (IAGA code: KLI) / Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2015. <http://doi.org/10.2205/kli2011min>.
56. **Татаринов В. Н., Бугаев Е. Г., Татаринова Т. А.** Оценка деформаций земной коры по данным спутниковых наблюдений при обосновании безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов // *Горный журнал*. 2015. № 10. С.27–32. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.05.
57. **Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Каган А. И., Пятыгин В. А.** Влияние температуры на изоляционные свойства породных массивов при захоронении радиоактивных отходов // *ГИАБ*. 2015. № 8. С. 338–345.
58. **Татаринов В. Н., Каган А. И.** Гипотеза развития геодинамического процесса при катастрофическом землетрясении Tohoku-Oki 11 марта 2011 г. // *Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле» (International scientific, technical and industrial electronic journal «Geo Science»)*. 2015. № 3. С. 69–94.
59. **Щербаков В. П., Хохлов А. В., Сычева Н. К.** О функции распределения величины геомагнитного поля по модели большого гауссового процесса и эмпирическим данным // *Физика Земли*. 2015. № 5. С. 179–192. DOI: 10.7868/S0320930X15030020 (Shcherbakov V. P., **Khokhlov A. V.**, Sycheva N. K. On the distribution function of the geomagnetic field intensity according to the model of a giant Gaussian process and empirical data // *Izvestiya Physics of the Solid Earth*. 2015. Vol. 51. Issue 5. P. 786–799. DOI: 10.1134/S1069351315050110).
60. **Бронский В. С., Шилобреева С. Н., Шематович В. И., Хохлов А. В.** Моделирование распыления ледяных поверхностей под воздействием ионов H<sup>+</sup>: перераспределение изотопов h и o в приложении к спутникам Юпитера // *Астрономический вестник*. 2015. Т. 49. № 4. С. 273–282. DOI: 10.7868/S0320930X15030020 (Bronsky V. S., Shilobreeva S. N., Shematovich V. I., **Khokhlov A. V.** Modeling of sputtering of the ice surfaces under impact of H<sup>+</sup> ions: redistribution of the h and o isotopes applied to the satellites of jupiter // *Solar System Research*. 2015. Vol. 49. No 4. P. 237–246. DOI: 10.1134/S0038094615030028).
61. **Sharkov E., Lebedev V., Chugaev A., Zabarinskaya L., Rodnikov A., Sergeeva N., Safonova I.** The Caucasian-Arabian segment of the Alpine-Himalayan collisional belt: Geology, volcanism and neotectonics // *Geoscience Frontiers*. 2015. Vol. 6. Issue 4. P. 513–522. DOI: 10.1016/j.gsf.2014.07.001.

## **Материалы и тезисы докладов конференций**

1. **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»*, 26–29 мая 2015 г. / отв. ред. О. В. Кириллова. СПб: Сев.-Зап. ин-т упр. – фил. РАНХиГС. 2015. С. 18–26.
2. **Getmanov V., Gvishiani A., Kamaev D., Kornilov A., Sidorov R.** Sea level prediction for the tsunami warning system // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General

- Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
3. **Гвишиани А. Д., Лукьянова Р. Ю.** Исследование геомагнитного поля в приложении к проблеме точности наклонного бурения скважин в арктическом регионе // Всероссийская конференция «Арктика – нефть и газ 2015». 21–22 апреля 2015 г.
  4. **Gvishiani A., Agayan S., Dzeboev B., Dobrovolsky M.** Recognition of strong earthquake-prone areas in the Caucasus, California and the Andes using clustering of epicenters // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
  5. **Gvishiani A., Rybkina A., Solovyev A., Manda M.** The atlas of the Earth's magnetic field 1500–2010 // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
  6. **Gvishiani A., Dzeboev B.** Areas prone to generation of strong earthquakes in the Andes // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
  7. **Гвишиани А. Д., Соловьев А. А.** Аналитический центр геомагнитных данных на базе ГЦ РАН как ЦКП для задач геофизики // Конференция «Центры коллективного пользования и уникальные научные установки в организациях, подведомственных ФАНО России». Секция 2: Науки об окружающей среде. г. Москва, 20–21 октября 2015 г.
  8. **Gvishiani A. D.** Systems analysis for geophysics: Challenges of the 21st century // Systems Analysis 2015. A conference in celebration of Howard Raiffa. Conference Program, Information, and Book of Abstracts. 11–13 November 2015. IIASA, Laxenburg, Austria. Laxenburg: IIASA, 2015. P. 17–18.
  9. **Gvishiani A. D., Dzeboev B. A.** System analysis in recognition of strong earthquake-prone areas // Systems Analysis 2015. A conference in celebration of Howard Raiffa. Conference Program, Information, and Book of Abstracts. 11–13 November 2015. IIASA, Laxenburg, Austria. Laxenburg: IIASA, 2015. P. 61.
  10. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., **Дзебоев Б. А.**, Кануков А. С. Учет направления прихода сейсмической волны при разработке моделей сейсмических воздействий // Современные строительные материалы, технологии и конструкции / Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова», ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова. Грозный, 2015. С. 514–520.
  11. Заалишвили В. Б., Джгамадзе А. К., Мельков Д. А., Дзеранов Б. В., Бурдзиева О. Г., **Дзебоев Б. А.**, Габараев А. Ф., Габеева И. Л., Кануков А. С., Шепелев В. Д. Уточнение инженерно-геологических условий территории с помощью микросейсм // Современные строительные материалы, технологии и конструкции / Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова», ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова. Грозный, 2015. С. 668–675.
  12. **Дзебоев Б. А.** Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии и на Кавказе с помощью алгоритмов дискретного математического анализа // II Международная научная конференция молодых ученых «Современные задачи геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства». Ереван–Гюмри–Цахкадзор, 26–29 мая 2015 г.
  13. **Dobrovolsky M. N., Soloviev A. A., Kudin D. V., Sidorov R. V., Grudnev A. A., Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R.** A hardware and software system for geomagnetic data retrieval, exchange, and system analysis // Systems Analysis 2015. A conference in celebration of Howard Raiffa. Conference Program, Information, and Book of Abstracts. 11–13 November 2015. IIASA, Laxenburg, Austria. Laxenburg: IIASA, 2015. P. 46.

14. **Ishkov V. N.** Geoeffectivity, distribution and the flare activity of the very large and gigantic sunspots groups // Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere. Sunny Beach, Bulgaria, 1–5 June 2015.
15. **Ishkov V. N.** Development of the current 24 solar cycles (77 months) // Book of Abstracts Seventh Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, Sunny Beach, Bulgaria, 1–5 June 2015. P. 2 <http://ws-sozopol.stil.bas.bg/>.
16. **Ishkov V. N.** Solar sunspot-forming activity and its development on the reliable W numbers series // Variability of the sun and sun-like stars: from asteroseismology to space weather. 6–8 July 2015, Baku, Azerbaijan. Programme and Abstract Book. <http://sdf.gov.az/conferences/sun2015/?page=prog>. P. 16–17.
17. **Kaftan V., Komitov B., Lebedev S.** Satellite and terrestrial data analysis of the Caspian Sea Level changes in relation to Cosmo-Geophysical Processes // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
18. Ustinov A., **Kaftan V.** Diurnal oscillations in local GNSS monitoring // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
19. Basmanov A. V., **Kaftan V. I.,** Sermyagin R. A., Oshchepkov L. A., Serebryakova L. I., Spesivcev A. A. Earth’s surface deformation of Baikal rift zone from the data of 2011-2014 GNSS companies // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
20. Ustinov A., **Kaftan V.** Subdaily periodicities of short GNSS baselines in relation with ionosphere // International Symposium Asia-Pacific Space Geodynamics (APSG) Project on “Geodetic Datum and Regional and Terrestrial Reference Frame realization”, 24–28 August 2015, Moscow. Electronic abstracts.
21. **Колесников И. Ю.** Влияние температуры на изоляционные свойства породных массивов при захоронении радиоактивных отходов // 23-й Международный научный симпозиум "Неделя горняка – 2015". 26–30 января 2015 г. Москва, МИСиС.
22. **Krasnoperov R.** Aspects of determination and preservation of azimuth mark reference direction at geomagnetic observatories // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
23. **Krasnoperov R., Grudnev A., Nikiforov O., Sidorov R., Soloviev A.** Modern geodetic solutions for the deployment of geomagnetic observatories in Russia // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
24. **Lebedev S. A.** Time-space variability of petroleum hydrocarbon background concentrations in the Baltic Sea based on remote sensing data and simulation // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
25. **Lebedev S. A.** Climatic change of the Baltic Sea level and sea surface temperature based on remote sensing data // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
26. Костяной А. Г., **Лебедев С. А.,** Семенов А. В. Спутниковый мониторинг трансграничных вод России // Труды Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы развития постсоветского пространства". 2015. Москва: Дипломатическая академия. С. 45–58.
27. **Лебедев С. А.,** Костяной А. Г., Гинзбург А. И. Динамика Каспийского моря по данным инструментальных измерений, результатам моделирования и данным дистанционного

- зондирования // Материалы III Международной научно-практической конференции «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». Майкоп: ИП Кучеренко В. О., 2015. С. 146–179.
28. **Lukianova R., Kozlovsky A.** IMF By effects in the plasma flow at the polar cap boundary // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
  29. **Лебедев С. А.** Спутниковая альтиметрия Белого и Баренцева морей // Программа и тезисы школы-семинара «Современные методы дистанционных исследований и прогноза параметров среды в Арктике». Таруса, 12–14 октября 2015 г. М.: ИКИ, 2015. С. 25–26.
  30. **Лебедев С. А.** Динамика Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии // Тринадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 16–20 ноября 2015, Москва, Россия. С. 28.
  31. **Лебедев С. А.** Исследование уровневого режима крупнейших озер Северо-Запада России по данным спутниковой альтиметрии // Тринадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 16–20 ноября 2015, Москва, Россия. С. 281.
  32. **Лебедев С. А.** Спутниковая альтиметрия Каспийского моря // Материалы Международной научно-практической конференции «Обеспечение гидрометеорологической и экологической безопасности морской деятельности», 16–17 октября 2015 года, Астрахань, Россия. С. 152–154.
  33. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., **Лебедев С. А.** Климатические тренды гидрометеорологических параметров Черного и Азовского морей // Тезисы докладов Шестой международной Школы-семинара «Спутниковые методы и системы исследования Земли», 2–6 марта 2015 г., г. Таруса.
  34. **Лебедев С. А.** Альтиметрия Океана // Тезисы докладов Шестой международной Школы-семинара «Спутниковые методы и системы исследования Земли», 2–6 марта 2015 г., г. Таруса.
  35. **Лебедев С. А.** Динамика Каспийского моря по данным инструментальных измерений, результатам моделирования и данным дистанционного зондирования // III Международная научно-практическая конференция «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий», 11–14 мая 2015, Майкоп, Республика Адыгея, Россия.
  36. Mursula K., **Lukianova R.**, Holappa L. Occurrence of high-speed solar wind streams over the Grand Modern Maximum // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
  37. **Lukianova R.** Geophysical and geomagnetic diagnosis of the sun and near-earth space // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
  38. **Лушников А. А., Любовцева Ю. С.** Происхождение нанометровых аэрозолей // Третьи Петряновские чтения. Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова, 15–17 апреля 2015 г., Москва, Россия.
  39. **Лушников А. А.** Механизмы образования нанодисперсных частиц // Третьи Петряновские чтения. Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова, 15–17 апреля 2015 г., Москва, Россия (пленарный).
  40. **Любовцева Ю. С.** Происхождение нанометровых аэрозолей // Третьи Петряновские чтения. Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова, 15–17 апреля 2015 г., Москва, Россия.
  41. **Nisilevich M., Kedrov E., Astapenkova A., Nechitailenko V., Sergeeva N.** Earth Science DataBase Project – ESDB // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly

- 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
42. **Nisilevich M., Sergeyeva N., Rodnikov A., Zabarinskaya L.** Rescue of Historical Data in the World Data Center for Solid Earth Physics // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
  43. **Pyatygina O., Rybkina A. Odintsova A.** Spherical screen and Orbus software as a new tool in geodata visualisation // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
  44. **Родников А. Г., Забаринская Л. П., Сергеева Н. А.** Зона контакта евразийского континента и Тихого океана: геодинамика, глубинное строение // Материалы III Школы-семинара «Гординские чтения». Москва, 21–23 апреля 2015 г. М.: ИФЗ РАН, 2015. С. 36–40.
  45. **Родников А. Г., Забаринская Л. П., Сергеева Н. А.** Моделирование глубинного строения окраинных морей Тихого океана вдоль геотраверсов // Труды IV Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU)», 19–24 октября 2015 г., Москва, Ломоносовский корпус МГУ. М.: Феория, 2015. С. 51–54.
  46. **Родников А. Г., Забаринская Л. П., Сергеева Н. А.** Глубинное строение регионов природных катастроф переходной зоны Евразия – Тихий океан // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска. Всероссийская научная конференция с международным участием. 26–30 мая 2015 г. Южно-Сахалинск, Россия. Сборник материалов. Том 2. Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 132–136.
  47. **Rybkina A., Rostovtseva Y.** Magnetic susceptibility data and astronomically-tuned cyclicity as a new tool for stratigraphy // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
  48. **Sidorov R., Getmanov V., Gvishiani A.** Filtering of geomagnetic observations by using the methods of the local approximation models // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
  49. **Soloviev A., Redmon R. J., Loto'aniu P. T.M., Singer H.** Automated recognition of jumps in GOES satellite magnetic data // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
  50. **Soloviev A., Bogoutdinov Sh., Chulliat A., Agayan S.** New fuzzy logic technique for studying geomagnetic secular acceleration using on-ground observations // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
  51. **Soloviev A., Sidorov R., Krasnoperov R., Gvishiani A., Kudin D., Grudnev A., Khokhlov A.** Improvement of geomagnetic observatories in Russia towards INTERMAGNET standard // 26-th IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) General Assembly 2015 «Earth and Environmental Sciences for Future Generations». Prague, Czech Republic, Prague Congress Centre, 22 June–2 July 2015.
  52. **Большаков Г. В., Габучян А. В., Князь В. А., Соловьев А. А.** Перспектива практического применения одонто- и окклюзиометрического программно-аппаратного комплекса // Стоматология славянских государств: сборник трудов по материалам VIII Международной научно-практической конференции / под. ред. А. В. Цимбалистова, Б. В. Трифонова, А. А. Копытова. Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2015. С. 46–50.
  53. **Gaboutchian A., Knyaz V., Petrosyan G., Soloviev A.** (2015) Prospects for odonto- and occlusiometric computer appliance use, in ISPRS WG V/5 and WGIII/3 // Workshop

- «Photogrammetric techniques for video surveillance, biometrics and biomedicine», S. Zheltov, Yu. Vizilter, V. Knyaz, Proceedings of PSBB. P. 61–62.
54. **Solovyev A., Rybkina A.** Challenges in geomagnetic data processing for a better understanding of geomagnetic field evolution (Invited), SCOSTEP-WDS // Workshop on Global Data Activities for the Study of Solar-Terrestrial Variability (28-30 September 2015, NICT, Tokyo, Japan). Program and Abstracts. P. 43–44.
55. **Tatarinov V., Morozov V., Kolesnikov I., Kagan A., Tatarinova T.** Geodynamic zoning for isolation of radioactive waste // Proceedings of the 24th International Mining Congress of Turkey, IMCET 2015. P. 508–513.
56. **Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Камнев Е. Н.** Возможности геодинамического моделирования при проектировании и обработке месторождений полезных ископаемых // Международная научно-техническая конференция «Современные инновационные технологии при добыче и переработке полезных ископаемых (робототехника, биотехнологии, безлюдная выемка, пастовая закладка и т. д.)». АО «ВНИПИПромтехнологии», 15–16 апреля, 2015. Москва.
57. **Татаринов В. Н., Каган А. И., Татаринова Т. А.** Землетрясение Tohoku-Oki – модель напряженного состояния литосферы // Всероссийская научная конференция с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска». 27–30 мая. 2015. г. Южно-Сахалинск.
58. **Tatarinov V., Morozov V., Tatarinova T.** Prediction geodynamic safety in the disposal of high-level radioactive waste in geological formations // GeoBerlin2015 – Dynamic Earth from Alfred Wegener to today and beyond – Abstracts. Annual Meeting of DGGV and DMG, 4–7 October 2015. Berlin: GFZ German Research Centre for Geosciences. P. 366. DOI:10.2312/GFZ.LIS.2015.003.
59. **Татаринов В. Н., Татаринова Т. А.** Прогнозирование геодинамического риска в районах размещения радиационно-опасных объектов // Международная научно-практическая конференция по проблемам снижения природных опасностей и рисков «ГЕОРИСК-2015». 2015. С. 357–362.
60. **Шестопалов И. П., Дубовик В. М.** О взаимосвязи эндогенной активности Земли с солнечной активностью и наземный мониторинг нейтронов для разработки нового подхода прогнозирования землетрясений, вулканических извержений и других неблагоприятных природных явлений // Материалы научного семинара «Система Планета Земля». Геологический факультет МГУ. Москва. 2015.

## **РИД за 2015 год**

№2015611786

Зарегистрирован

6 февраля 2015 г.

«FellowRAS»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Рыбкина А. И., Хачатрян С. А., Одинцова А. А.**

№2015615570

Зарегистрирован

21 мая 2015 г.

«ELXPAPER»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Нечитайленко В. А.**

№2015615571

Зарегистрирован

21 мая 2015 г.

«Программа для расчета и визуализации разности между скалярными данными и модулем вектора поля, рассчитанным по векторным данным»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Соловьев А. А.**, Кудин Д. В.

№2015615555

Зарегистрирован

20 мая 2015 г.

«Программа для расчета и визуализации базисных значений компонент магнитного поля»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Соловьев А. А.**, Кудин Д. В.

№2015615858

Зарегистрирован

26 мая 2015 г.

«Программа оценивания параметров движения объектов с повышенным разрешением для доплеровских акустических систем»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Гетманов В. Г.**, Фирсов А. А.

№2015615859

Зарегистрирован

26 мая 2015 г.

«Программа оценивания параметров движения объектов для доплеровских оптических систем»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Гетманов В. Г.**, Фирсов А. А.

№2015615860

Зарегистрирован

26 мая 2015 г.

«Программа оценивания параметров движения объектов для доплеровских акустических систем»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Гетманов В. Г.**, Фирсов А. А.

№2015615863

Зарегистрирован

26 мая 2015 г.

«Программа фильтрации множественных шумовых отражений для доплеровских акустических систем»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Гетманов В. Г.**, Фирсов А. А.

№2015662959

Зарегистрирован

8 декабря 2015 г.

«DPS (Descrete Perfect Sets)»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Добровольский М. Н., Дзедобоев Б. А.**

№2015663430

Зарегистрирован

17 декабря 2015 г.

«Программа для проведения районирования территориальных единиц России по уровню заболеваемости населения RM 1.0»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Любовцева Ю. С., Каган А. И., Лушников А. А.**

№2015660174

Зарегистрирован

17 декабря 2015 г.

«Программа для проведения медико-экологического районирования территориальных единиц России MEZ 1.0»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Любовцева Ю. С., Каган А. И., Лушников А. А.**

№2015663418

Зарегистрирован

17 декабря 2015 г.

«Программа для расчета напряженно-деформированного состояния породного массива под воздействием тектонических и тепловых полей напряжений при подземной изоляции радиоактивных отходов HEAT SDS»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Каган А. И., Морозов В. Н., Татаринев В. Н.**

№2015663417

Зарегистрирован

17 декабря 2015 г.

«Программа для расчета изменения поля температур породного массива при подземной изоляции теплоизлучающих радиоактивных отходов HEAT HLRW»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Каган А. И., Морозов В. Н., Татаринев В. Н.**

№2015663454

Зарегистрирован

18 декабря 2015 г.

«FL\_SPLU»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Гетманов В. Г., Сидоров Р. В.**

№2015663453

Зарегистрирован

18 декабря 2015 г.

«FL\_SLAM»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Гетманов В. Г., Дабагян Р. А., Сидоров Р. В.**

№2015663452

Зарегистрирован

18 декабря 2015 г.

«FL\_VSMC»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Гетманов В. Г., Сидоров Р. В.**

№2015663451

Зарегистрирован

18 декабря 2015 г.

«FL\_VSML»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук

Авторы: **Гетманов В. Г., Сидоров Р. В.**