

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Геофизический центр Российской академии наук

О Т Ч Е Т
О ВЫПОЛНЕНИИ ГОСУДАРСТВЕННОГО
ЗАДАНИЯ
на 2014 год

Москва

2015

GEOPHYSICAL CENTER
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

REPORT
OF GEOPHYSICAL CENTER OF RAS
FOR 2014

Results of the State Task

Moscow
2015



The present edition contains information about the work of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (GC RAS) in 2014. The most important results of research carried out in the directions of the Program of fundamental scientific research of the state academies of sciences for 2013–2020, in the framework of the state task, programs of the Presidium of the Russian Academy of Sciences and departments of RAS and grants of the Russian Foundation for Basic Research. Research activities carried out at the expense of income-generating activities are listed. The full list of GC RAS employees' publications in 2014 is also included. The edition is intended for specialists in the field of geophysics and related geosciences.

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 29.04.2015

Layout Production:

O. V. Alexanova, E. O. Kedrov

Report of Geophysical Center of RAS for 2014.

M.: GC RAS, 2015, 149 pp., 92 Figs.

DOI: 10.2205/2015BS017

URL: <http://ebooks.wdcb.ru/2015/2015BS017/2015BS017.pdf>

ISSN: 2308-5983

© 2015 Geophysical Center of RAS



В настоящем издании содержатся сведения о работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизический центр Российской академии наук (ГЦ РАН) в 2014 году. Освещены наиболее важные результаты исследований, проводимых по направлениям Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., в рамках государственного задания, программ Президиума и отделений РАН, а также грантов РФФИ. Перечислены научные исследования, проводимые за счет средств от приносящей доход деятельности. Приведен полный список публикаций сотрудников ГЦ РАН за 2014 год.

Издание рассчитано на специалистов в области геофизики и смежных наук о Земле.

Ответственные редакторы:

А. 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 29.04.2015 г.

Компьютерная подготовка оригинал-макета:

О. В. Алексанова, Э. О. Кедров

Отчет о выполнении государственного задания на 2014 год

М.: ГЦ РАН, 2015, 149с., 92 ил.

DOI: 10.2205/2015BS017

URL: <http://ebooks.wdcb.ru/2015/2015BS017/2015BS017.pdf>

ISSN: 2308-5983

© ГЦ РАН, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

1. О государственном задании ГЦ РАН на 2014 год	6
2. Разработка информационных технологий организации доступа к ресурсам и совершенствование управления данными Мировых центров данных по физике твердой Земли и солнечно-земной физике.....	12
3. Исследование и прогнозирование нелинейных геодинамических процессов в гетерогенной блочной среде при подземной изоляции радиоактивных отходов	24
4. Развитие и сопровождение интерактивного ресурса данных по солнечно-земной физике SPIDR.....	35
5. Разработка и внедрение методов дискретного математического анализа для изучения состояния геомагнитной активности и контроля качества магнитных данных	40
6. Разработка алгоритмов сглаживания динамических геофизических данных на базе дискретного математического анализа	53
7. Интеллектуальная медицинская геоинформационная система для территории России в условиях изменяющегося климата.....	60
8. Аналитическая геоинформационная система для комплексной оценки ресурсов стратегического минерального сырья (ГИС «Ресурсы»).....	68
9. Расширение базы геоданных ГИС за счет включения новых данных по ГНСС, ДЗЗ и наблюдательным геофизическим сетям, данных о сплоченности морского льда и движениях земной поверхности в пунктах ГНСС; разработка архитектуры ГИС-приложения и интеграция алгоритмов пространственного анализа данных о геофизических полях в среду ГИС.....	76
10. Разработка метода спектрально-временного анализа (СВАН) для распознавания магнитных бурь в наблюдениях магнитного поля Земли; разработка метода СВАН для оценивания параметров пульсаций магнитного поля Земли с использованием полигармонических моделей и параллельных вычислений.....	81
11. Развитие новых методов распознавания аномальных событий на временных рядах обсерваторских наблюдений магнитного поля Земли и расширение сети геомагнитных наблюдений в РФ	92
12. Исследование геомагнитного поля и разработка методов фильтрации его естественных вариаций в целях повышения точности наклонного бурения скважин в Арктическом регионе.....	103
13. Создание семейства численных физико-математических моделей для изучения и прогнозирования электродинамики верхней атмосферы Земли с использованием данных геомагнитного спутника SWARM и высокопроизводительных компьютерных систем.....	110
14. Распознавание предвестников геомагнитных бурь на основе спектрально-временного анализа наблюдений магнитных обсерваторий с использованием полигармонических моделей и вычислительных систем сверхвысокой производительности	117
15. Оценка геомагнитной активности в режиме реального времени методами дискретного математического анализа	128
16. Усовершенствование моделей вариаций геомагнитного поля с использованием новых данных обсерваторий российско-украинского сегмента сети ИНТЕРМАГNET	131
17. Построение геодинамических моделей глубинного строения регионов природных катастроф.....	134
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОТРУДНИКОВ ГЦ РАН за 2014 год	137

1. О государственном задании ГЦ РАН на 2014 год

Государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизический центр Российской академии наук (ГЦ РАН) на 2014 год включало в себя 17 научно-исследовательских работ по следующим приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в РФ:

- Информационно-телекоммуникационные системы;
- Науки о жизни;
- Рациональное природопользование;
- Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика;

разделам перечня критических технологий РФ:

- Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения;
- Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера;

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

- 70. Физические поля, внутреннее строение Земли и глубинные геодинамические процессы;
- 74. Комплексное освоение и сохранение недр Земли, инновационные процессы разработки месторождений полезных ископаемых и глубокой переработки минерального сырья;
- 78. Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий;
- 79. Эволюция окружающей среды и климата под воздействием природных и антропогенных факторов, научные основы рационального природопользования и устойчивого развития; территориальная организация хозяйства и общества;
- 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).

В рамках фундаментальных исследований по данным направлениям выполнялись:

- | | |
|--|-----|
| 1. Проекты в рамках тем НИР (базовое финансирование) | – 5 |
| 2. Проекты фундаментальных программ Президиума РАН и ОНЗ РАН | – 8 |

В рамках научных исследований за счет средств от приносящей доход деятельности:

1. Проекты РФФИ	– 3
2. Государственные контракты	– 1
3. Контракты с российскими заказчиками	– 6

Согласно государственному заданию в рамках фундаментальных исследований лаборатории ГЦ РАН выполняли научные исследования по следующим темам:

1. Тема № 01201456271 «Разработка информационных технологий организации доступа к ресурсам и совершенствование управления данными Мировых центров данных по физике твердой Земли и солнечно-земной физике». 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 (тема продолжается);
2. Тема № 01201456270 «Исследование и прогнозирование нелинейных геодинамических процессов в гетерогенной блочной среде при подземной изоляции радиоактивных отходов». Руководители – гл.н.с., д.т.н. В. Н. Морозов; зав. лаб., д.т.н. В. Н. Татаринев (тема продолжается);
3. Тема № 01201252859 «Развитие и сопровождение интерактивного ресурса данных по солнечно-земной физике SPIDR». Руководитель – в.н.с., к.ф.-м.н. М. Н. Жижин (тема завершена);
4. Тема № 01201252857 «Разработка и внедрение методов дискретного математического анализа для изучения состояния геомагнитной активности и контроля качества магнитных данных». Руководитель – зам. директора по науке, зав. лаб., д.ф.-м.н. А. А. Соловьев (тема завершена);
5. Тема № 01201252858 «Разработка алгоритмов сглаживания динамических геофизических данных на базе дискретного математического анализа». Руководитель – гл.н.с., д.ф.-м.н. С. М. Агаян (тема завершена).

В 2014 г. ГЦ РАН принимал участие в выполнении следующих научных программ Президиума РАН и ОНЗ РАН согласно государственному заданию:

1. Программа Президиума РАН 5П «Фундаментальные науки – медицине».
 - Проект «Интеллектуальная медицинская геоинформационная система для территории России в условиях изменяющегося климата».
2. Программа Президиума РАН 27П «Фундаментальный базис инновационных технологий прогноза оценки, добычи и глубокой комплексной переработки стратегического минерального сырья, необходимого для модернизации экономики России».
 - Проект «Аналитическая геоинформационная система для комплексной оценки ресурсов стратегического минерального сырья (ГИС «Ресурсы»)».

3. Программа Президиума РАН 44П «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации».
 - Проект «Исследование геомагнитного поля и разработка методов фильтрации его естественных вариаций в целях повышения точности наклонного бурения скважин в Арктическом регионе».
4. Программа Президиума РАН 43П «Фундаментальные проблемы математического моделирования».
 - Проект «Распознавание предвестников геомагнитных бурь на основе спектрально-временного анализа наблюдений магнитных обсерваторий с использованием полигармонических моделей и вычислительных систем сверхвысокой производительности»;
 - 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».
5. Программа Отделения наук о Земле РАН № 7 «Геофизические данные: анализ и интерпретация».
 - Проект «Расширение базы геоданных ГИС за счет включения новых данных по ГНСС, ДЗЗ и наблюдательным геофизическим сетям, данных о сплоченности морского льда и движениях земной поверхности в пунктах ГНСС; разработка архитектуры ГИС-приложения и интеграция алгоритмов пространственного анализа данных о геофизических полях в среду ГИС»;
 - Проект «Разработка метода спектрально-временного анализа (СВАН) для распознавания магнитных бурь в наблюдениях магнитного поля Земли; Разработка метода СВАН для оценивания параметров пульсаций магнитного поля Земли с использованием полигармонических моделей и параллельных вычислений»;
 - Проект «Развитие новых методов распознавания аномальных событий на временных рядах обсерваторских наблюдений магнитного поля Земли и расширение сети геомагнитных наблюдений в РФ».

Перечень научных исследований за счет средств от приносящей доход деятельности в 2014 году включает в себя:

1. Соглашение № 14.607.21.0058 о предоставлении субсидии. Выполнение прикладных научных исследований по лоту шифр 2014-14-579-0057 по теме «Разработка инновационной технологии и создание экспериментального образца аппаратно-программного комплекса для мониторинга экстремальных геомагнитных явлений с использованием наземных и спутниковых данных» (шифр заявки «2014-14-579-0057-013») 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 (продолжается);

2. Грант РФФИ № 12-05-00583 «Оценка геомагнитной активности в режиме реального времени методами дискретного математического анализа». Руководитель: директор ГЦ РАН, академик А. Д. Гвишиани (завершен);
3. Грант РФФИ № 12-05-00029 «Построение геодинамических моделей глубинного строения регионов природных катастроф». Руководитель: гл.н.с., д.г.-м.н. А. Г. Родников (завершен);
4. 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 (продолжается);
5. Договор № 1-ГД «Проведение цикла GPS-наблюдений за современными движениями земной коры». Заказчик: ОАО «Красноярская горно-геологическая компания» (ОАО «Красноярскгеология»). Руководитель: гл.н.с., д.т.н. В. Н. Морозов (договор завершен);
6. Договор №1/14 «Услуга по предоставлению цифрового демонстрационного комплекса со сферическим экраном для использования на VII-м Международном салоне «Комплексная безопасность 2014». Заказчик: ФГБУ «НПО «Тайфун». Руководитель: зав. сектором А. И. Рыбкина (договор завершен);
7. Лицензионный договор № 1 о предоставлении неисключительного права использования Атласа магнитного поля Земли. Заказчик: Комиссия по геологической карте мира (КГКМ). Руководитель: зав. сектором А. И. Рыбкина (договор завершен);
8. Договор б/н «Разработка сервиса геоинформационной системы (ГИС) по новообразованиям». Заказчик: Благотворительный фонд Марка Кауфмана. Руководитель: зав. сектором А. И. Рыбкина (договор завершен);
9. Договор № 12196 «Выполнение магниторазведочных работ на местности для выявления возможных мест строительства павильонов геофизической обсерватории». Заказчик: компания «Шлюмберже Лоджелко, Инк.». Руководитель: зав. лаб., д.ф.-м.н. А. А. Соловьев (договор завершен);
10. Договор № 355.433/2014 «Геодезические изыскания на полигоне ОАО «Вологодского оптико-механического завода». Заказчик: ОАО «Вологодский оптико-механический завод». Руководитель: зав. лаб., д.ф.-м.н. А. А. Соловьев (договор завершен).

В 2013 году ГЦ РАН присоединился к Технологической платформе (ТП) «Технологии экологического развития» (Протокол № 7 от 6 марта 2013 года заседания Правления ТП). Организация-координатор – Русское географическое общество. В соответствии с

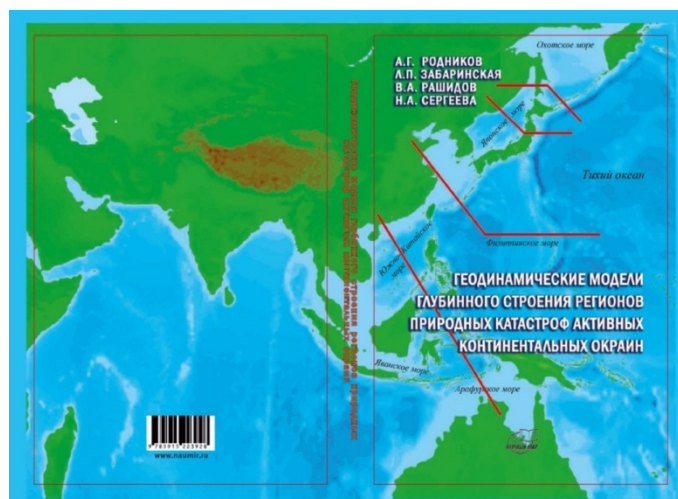


Рисунок 1.2 – Монография «Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин»

Результат № 3. В зоне сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты создан геодинамический полигон для наблюдений за современными смещениями блоков земной коры на основе глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. В 2014 г. была зарегистрирована геодинамическая активизация Муратовского разлома. Образование зон растягивающих напряжений в восточной части и сжимающих в западной части района, как следствия вертикальных положительных движений глыбы Сибирской платформы, принципиально важны для прогноза сохранности изоляционных свойств пород при проектировании первого в России пункта глубинного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Кафтан В. И., Колесников И. Ю., Каган А. И.).

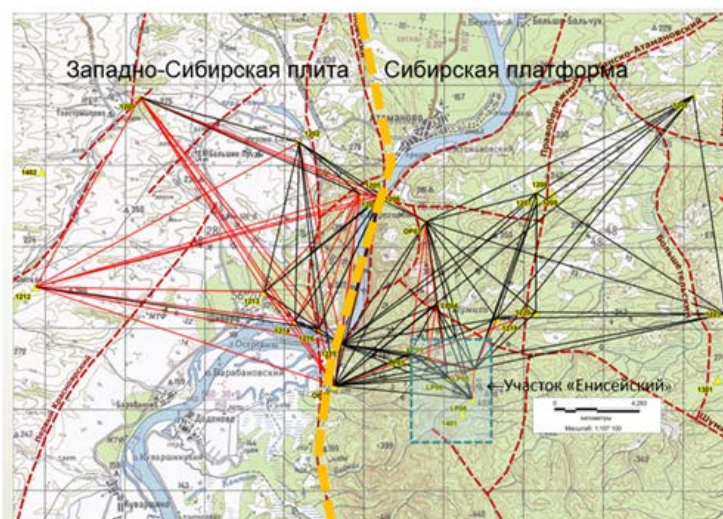


Рисунок 1.3 – Изменения длин базисных линий за 2013–2014 гг. Черный цвет – длина линий не изменилась или увеличилась (растяжение), красный цвет – длина линий уменьшилась (сжатие)

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

Номер гос. регистрации № 01201456271 (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

Данная научно-исследовательская работа направлена на разработку новых информационных технологий, обеспечивающих свободный и удобный доступ к ресурсам Мировых центров данных (МЦД) по физике твердой Земли (ФТЗ) и солнечно-земной физике (СЗФ) и базам электронных публикаций Геофизического центра РАН, а также на совершенствование системы управления данными МЦД для интеграции информационных ресурсов Центров в Мировую систему данных (МСД) Международного совета по науке (МСН), регулярными членами которой они являются с 2012 г.

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 2014 г. основным объектом исследования, обработки и реорганизации были все виды данных по разделу «Геомагнитные вариации» МЦД по СЗФ. В этом разделе представлены результаты наблюдений, полученные мировой сетью геомагнитных обсерваторий и станций за период с 1957 г. по настоящее время: индексы геомагнитной активности, магнитограммы, минутные, среднечасовые и среднегодовые значения элементов магнитного поля Земли, данные о магнитных бурях, внезапных началах бурь и геомагнитных пульсациях.

Проведена инвентаризация данных, проверены и дополнены записи о наличии данных в регистрационной системе МЦД. Реорганизованы веб-страницы доступа к данным, размещенным на сайте МЦД. Обращение к каждому виду данных организовано по прямым ссылкам, для каждого вида данных создана отдельная интернет-страница, с которой можно перейти к подробному описанию данных, описанию формата представления данных и к самим данным (рис. 2.1). Подготовлены и размещены на сайте новые описания данных и описания форматов.

Для данных, представляющих собой временные ряды за длительный промежуток времени и полученных на геомагнитных станциях России и стран СНГ, разработана структура реляционной базы данных под СУБД MySQL для организации доступа к данным через форму запроса, позволяющую формулировать выбор данных из БД по различным параметрам. База данных представляет собой структурированную совокупность данных, представленных изначально в текстовом (ASCII) формате. Это таблицы средне-

годовых, среднечасовых и минутных значений, элементов геомагнитного поля и уникальный массив значений K -индекса, зарегистрированных на 33 станциях России и стран СНГ с 1957 г. по настоящее время. Создан макет формы запроса для выборки из БД необходимых данных по условиям, примененным к ряду параметров. Написан гипертекстовый код, формирующий интернет-страницу с формой запроса, разработана блок-схема выполнения запроса.

The screenshot shows a website interface for the 'World Data Center for Solar-Terrestrial Physics'. On the left is a navigation menu with links like 'Главная страница', 'Данные', 'Геомагнитные данные', 'SPIDB', 'Интерактив', 'Прогнозы', 'Ссылки', and 'Контакты/Справка'. The main content area is titled 'Индексы геомагнитной активности' and lists several indices: 'aa индекс', 'Kp и ap индексы', 'AE, AL, AU, AI индексы', 'AE, AL, AU, AI индексы', 'Dst индекс', 'ASY и SYM индексы', and 'Kp, Kt, Ks индексы'. A red arrow points from the 'aa индекс' link to a detailed description box on the right. This box contains the title 'Описание геомагнитных индексов', a general definition, and specific details for the 'aa индекс', including its calculation and units. Below the text is a table showing the format of the 'aa индекс' data.

aa индекс - формат данных
1 - 4 I4 Год
5 - 6 I2 Месяц
7 - 8 I2 День
9 - 32 I13 Восемь 3-часовых значений aa индекса для одного дня
33 - 37 F9.2 Дневной aa индекс

Рисунок 2.1 – Пример интернет-страницы для доступа к различным индексам геомагнитной активности, с которой можно перейти к описанию данных, описанию формата представления данных и к самим данным

Все новые информационные ресурсы в электронной форме, поступившие в Мировые центры данных в 2014 г., размещены на сайте в открытом доступе. В МЦД по СЗФ из геофизической обсерватории «Паратунка» ИКИР ДВО РАН был передан на хранение большой массив цифровых изображений магнитограмм за 40 лет (более 50 000 файлов). Поступившие данные были проверены и размещены на сайте вместе с сопроводительными документами. Одновременно по-новому, более удобно для пользователей, был организован доступ ко всем данным из раздела «Магнитограммы» через сводную таблицу, в которой дана информация о станциях и периодах времени, для которых есть данные (рис. 2.2).

Созданы программные модули для анализа, проверки качества и записи данных в стандартных форматах для индексов геомагнитной активности a_m , a_n , a_s и aa .

Осуществлен перевод 5 каталогов данных о солнечных протонных событиях за период 1970–1996 гг. из отдельных постраничных изображений формата TIFF (более 900 страниц) в единые файлы формата PDF. Каталоги в новом формате размещены на сайте.

С целью увеличения существующих электронных информационных ресурсов по геофизике, а также предотвращения утраты ценнейших старых данных, продолжалась начатая в 2013 г. работа по переводу исторических данных с бумажного носителя в электронную форму (формат PDF) поточным сканированием.

Цифровые изображения магнитограмм

Стандартные аналоговые магнитограммы (20 км/сек) представлены в виде цифровых изображений, полученных путем сканирования или фотографирования.
Исходные размеры магнитограммы - 280 x 500 мм. Время UT (Universal Time).

Обсерватория, географические координаты	Код	Период
Арктик ¹ 56.43° N; 584.57° E	ARS	1999, 2000, 2001, 2002
Владивосток ¹ 43.68° N; 132.17° E	VLA	1914, 1935, 1936, 1937, 1938, 1939, 1940, 1941, 1942, 1943, 1944, 1945, 1946, 1947, 1948
Иркутск ¹ 52.17° N; 104.45° E	IRT	1949, 1950, 1951, 1952, 1953, 1954
Казань ¹ 55.83° N; 48.85° E	KZN	1951, 1952, 1953, 1954, 1955, 1956, 1957
Львов ¹ 49.90° N; 23.75° E	LVV	1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001
Магалам ² 60.12° N; 151.02° E	MGD	1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005
Москва ¹⁺² 55.47° N; 37.31° E	MOS	1944, 1945, 1946, 1947, 1948, 1949, 1950, 1951, 1952, 1953, 1954, 1955, 1956, 1957, 1982, 1983, 1984, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007
Новосибирск ⁴ 55.03° N; 82.90° E	NVS	1966, 1967, 1968, 1969, 1970, 1971, 1972, 1973, 1974, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004
Одесса ¹⁺² 46.78° N; 30.88° E	ODE	1946, 1947, 1948, 1949, 1950, 1951, 1952, 1953, 1954, 1955, 1956, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 2003, 2004
Паратунка ⁴ 53.10° N; 158.63° E Сопроводительная информация	PET	1967, 1968, 1969, 1970, 1971, 1972, 1973, 1974, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006

Рисунок 2.2 – Интернет-страница доступа к цифровым изображениям магнитограмм

Завершен перевод в электронную форму таблиц (36 000 бумажных документов) с определениями *K* и *C* индексов и данными о магнитных бурях на обсерваториях России и стран СНГ (1957–2005 гг.) (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Геомагнитные данные, переведенные в электронную форму

Код станции	<i>K</i> -индекс	Бури	Внезапные начала	Код станции	<i>K</i> -индекс	Бури	Внезапные начала
AAA	1964–1990	1989, 1990		MOL	1975–1979		
ARS	1976–2005	2000–2005		MOS	1957–1990	2000–2005	1957–1978
ASH	1958–1990		1958–1970	NVS	1971–2005	2000–2005	
CCS	1957–1990	1989		ODE	1957–1990	1989	1957–1977
CWE	1957–1990	1989, 1990		PET	1973–2003	1989–2003	1989–1991
DIK	1957–1990			POD	1974–2005	1990–2005	
HIS	1959–1990	1989, 1990		SRE	1957–1966		1957–1965
IRT	1957–1990	1982–1990	1957–1988	SVD	1957–1975		
KNG	2001–2005	2001–2005		TFS	1957–1990	1989–2003	1957–1983
KGD	1973–1979			TIK	1957–1990	1989	
KIV	1958–1990		1959–1981	TKT	1957–1990	1989	1957–1979
KZN	1957–1990	2000–2005	1957–1983	TMK	1958–1970		
LNN	1957–1990	2000–2005		UBA	1973–1979	1988, 1989	1966–1989
LVV	1957–1990	1989		VLA	1957–1990	2000–2005	
MGD	1965–1994	2000–2005		VOS	1958–1979		
MIR	1957–1979			YAK	1957–1990	2000–2005	
MMK	1957–1990	1989		YSS	1957–1979	2000–2005	
MNK	1962–1990	2000–2005					

Все электронные документы прошли процедуры проверки и редактирования с использованием ПО ScanSoft PaperPort. Составлен каталог электронных документов. База данных сформирована и размещена на сайте в свободном доступе. О результатах этой работы был представлен доклад на конференцию CODATA 2014 г. [1]. Начат перевод в электронную форму таблиц среднечасовых значений элементов геомагнитного поля станций России и стран СНГ. Объем этой части данных около 350 тысяч документов. В 2014 г. переведено в электронную форму более 25 тысяч документов. В процессе работы были найдены таблицы за некоторые годы, отсутствовавшие в виде электронных числовых массивов. Такие данные переведены в цифровую форму с использованием ПО ABBYY FineReader 9.0 для трансформации изображений в текстовый формат и с последующей проверкой при помощи ПО Microsoft Excel 2007, используя вычисления средних значений строк и столбцов.

Подготовлены метаданные для ряда данных из раздела «Геомагнитные вариации» на языке XML стандарта ISO (DIF-формат) и размещены в репозитории метаданных, из которого по протоколу OAI-PMH (Open Archives Initiatives Protocol for Metadata Harvesting) включены в базу метаданных Портала Мировой системы данных.

В соответствии с решением Научного комитета МСД были подготовлены стендовые доклады [2, 3] в качестве отчетов о деятельности МЦД по СЗФ и МЦД по ФТЗ за два года для представления на Форуме членов МСД, проходившем 2 ноября 2014 г. в Нью Дели, Индия.

Одновременно с описанными работами проведены научные исследования, основанные на использовании и анализе больших объемов данных, собранных в МЦД.

2.2. Построение геодинамических моделей глубинного строения пассивных континентальных окраин России вдоль Северного Ледовитого океана с целью возможного прогнозирования перспективных районов распространения залежей полезных ископаемых

Одним из таких исследований является изучение глубинного строения пассивных континентальных окраин России вдоль Северного Ледовитого океана. В 2014 г. были собраны геолого-геофизические данные для региона Карского моря из фондов МЦД, многочисленных публикаций и интернет-источников. Рассмотрена геодинамика развития литосферных плит Северного Ледовитого океана, определяющая строение и эволюцию пассивных континентальных окраин. Построена структурная схема литосферных плит с указанием направления и скорости их перемещения по данным GPS. По данным многочисленных сейсмических исследований построен глубинный разрез земной коры и верхней мантии Южно-Карской впадины [4–6] (рис. 2.3). Юго-западная часть разреза расположена в пределах Западно-Сибирской плиты, а северо-восточная открывается в океан. Кора впадины имеет двухслойное строение. Глубина Мохо увеличивается до 43 км. Максимальная мощность осадочного слоя составляет 12 км, слой характеризуется повышенным градиентом и скоростями от 3 до 6,2 км/с. Верхняя часть коры со скоростью от

6,4 до 6,8 км/с и мощностью около 12 км образует прогиб до глубины 25 км. Отмечаются пониженные сейсмические скорости в основании коры вдоль поверхности Мохо, свидетельствующие об активности глубинных процессов в верхней мантии. В основании впадины, вероятно, прослеживаются рифтовые системы, протянувшиеся со стороны Западно-Сибирской низменности.

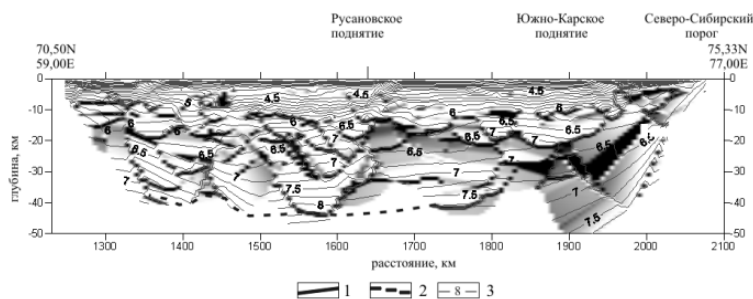


Рисунок 2.3 – Сейсмический разрез земной коры Южно-Карской впадины: 1 – главные раздели в земной коре; 2 – граница Мохо; 3 – изолинии сейсмических скоростей, км/с

Установлено, что развитие Южно-Карской впадины связано с эволюцией Западно-Сибирской плиты и образованием Северного Ледовитого океана. До позднего мела Южно-Карская впадина была северной окраиной Западно-Сибирской плиты, образование которой связано с пермско-триасовыми процессами рифтогенеза, сопровождаемого излияниями траппов. В мезозое в связи с раскрытием Северного Ледовитого океана Южно-Карская впадина стала частью пассивной континентальной окраины с накоплением мощных толщ морских песчано-глинистых пород.

В 2014 г. была подготовлена и опубликована монография «Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин» [7], являющаяся итогом многолетней работы по изучению глубинного строения переходной зоны от Евразийского континента к Тихому океану. Впервые построены геодинамические модели глубинного строения литосферы регионов Охотского, Японского, Филиппинского и Южно-Китайского морей, характеризующихся повышенной сейсмичностью, извержениями вулканов и другими природными катастрофами. Модели основаны на комплексной интерпретации всех доступных геолого-геофизических данных. Установлено аномальное строение недр Земли под регионами природных катастроф, выделены древние и зарождающиеся субдукционные зоны, обуславливающие сейсмические и вулканические явления, оконтурены астеносферные диапиры, определяющие строение земной коры.

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

Вторым направлением научных исследований является изучение связи сейсмичности и вулканизма Земли с солнечной активностью и процесса генерации нейтронов в связи с эндогенной активностью Земли.

Для исследования связи сейсмичности и вулканизма Земли с солнечной активностью использовался метод анализа, основанный на вейвлет-разложении сигналов в неортогональных базисах [8]. Результатом является вывод о существовании общего векового цикла в системе Солнце–Земля, имеющего свои особенности как на Солнце, так и на Земле. На Солнце в начале цикла активность незначительная, затем она постепенно увеличивается. На Земле, наоборот, в начале цикла сейсмичность максимальна, затем она постепенно уменьшается. Это свидетельствует об отрицательной корреляции сейсмичности Земли с солнечной активностью.

Ранее было показано, что землетрясения и вулканические извержения являются источником нейтронов. В экспериментах, проводимых в 2009–2012 гг. одновременно в ИЗМИРАН и на пункте комплексных наблюдений Камчатского филиала Геофизической службы РАН вблизи г. Петропавловск-Камчатский, были зарегистрированы потоки частиц, связанные с сильными землетрясениями и вулканическим извержением в Исландии. На этом приборном комплексе регистрируются тепловые нейтроны и быстрые нейтроны с энергией больше 2 МэВ. В 2013–2014 гг. наблюдались всплески потоков нейтронов не только на этом приборном комплексе, но и на нейтронных мониторах (НМ), пороговая энергия которых равна 20–30 МэВ (НМ Баксан, Эльбрус; НМ JUNG1, Швейцария). На этих НМ на фоне непрерывного нарастания величины потоков нейтронов наблюдались всплески с интенсивностью потоков частиц, достигавшей около 10 000% и 1000% соответственно. Наблюдались они на протяжении нескольких часов. Эти исследования имеют важное научное и прикладное значение [9]. На их основании можно сделать вывод о том, что в ближайшее время могут произойти сильные землетрясения и вулканические извержения в различных районах мира, но определить их точное место и время невозможно из-за ограниченного количества данных.

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

Осуществлен сбор данных по геологии, геофизике и дистанционному зондированию и предварительный анализ собранных данных. Проведена подготовка и оформление цифровых тематических карт в среде ГИС, подготовлены метаданные. Подготовленные с помощью серверного ПО тематические слои данных опубликованы в виде единого картографического веб-сервиса, обеспечивающего оперативный доступ к геопространственным данным.

В базу геопространственных данных включена цифровая карта средних значений мощности осадочного чехла, подготовленная на основе имеющихся геологических карт разного масштаба, оцифрованных в ИФЗ РАН, GFZ Potsdam, NOAA [10–15]. Включенные в базу данные были обработаны, оформлены и опубликованы в формате картографических веб-сервисов. К ним открыт свободный доступ посредством геопортала ГЦ РАН (рис. 2.4).

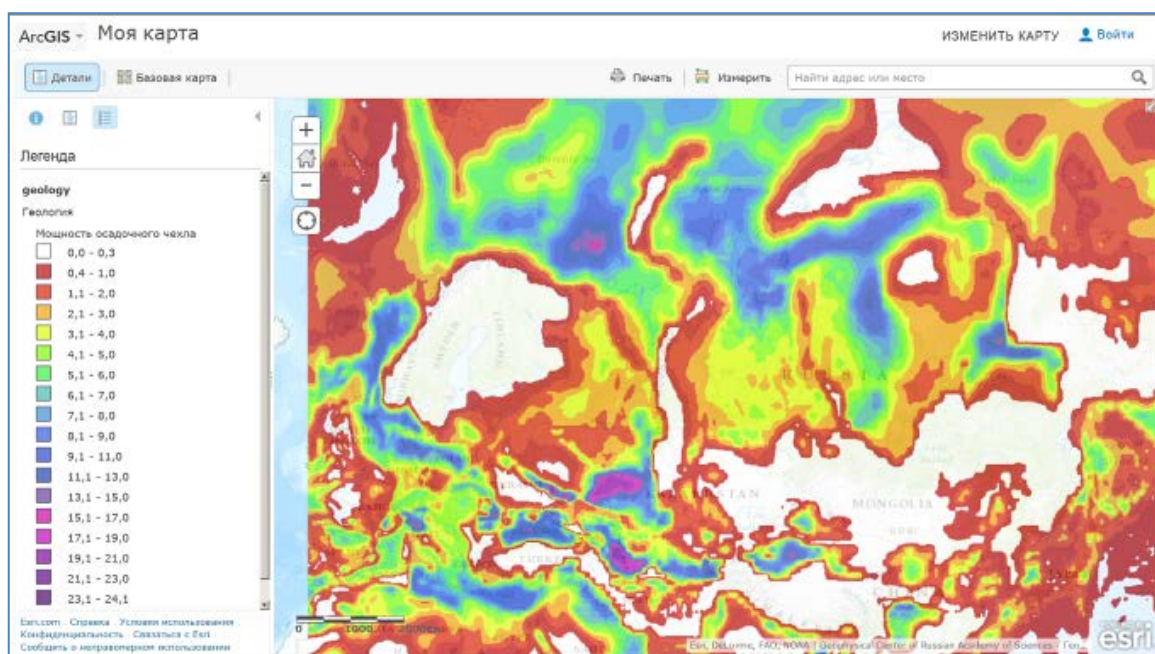


Рисунок 2.4 – Средние значения мощности осадочного чехла – глубины от поверхности твердой Земли до поверхности кристаллического фундамента

2.5. Организация удаленного доступа к картографическим веб-сервисам с помощью специализированного геопортала ГЦ РАН

В 2014 г. представлена новая версия геопортала ГЦ РАН (<http://gis.gcras.ru/>), ставшего единой точкой интерактивного доступа к публикуемым картографическим веб-сервисам. Выбранная технология геопортала обладает большой гибкостью и имеет серьезный потенциал для расширения своих функциональных возможностей. В интерфейсе геопортала предоставлены возможности использования различных вариантов представления цифровых геопространственных данных. Функциональные возможности геопортала позволяют эффективно и быстро организовать многоуровневый авторизованный доступ к тем или иным картографическим сервисам.

На главной странице геопортала представлено общее описание проекта, изложено основное назначение и цели проекта, кратко описано общее представление и архитектура всей системы. В разделе «Данные» представлено общее описание базы геоданных, перечислены основные тематические категории геоданных, даны примеры оформления некоторых тематических слоев. Отдельно дано описание структуры метаданных. Для организации интерактивного доступа к базе метаданных через Интернет были использованы технологии JavaServer Pages (JSP) и JavaScript. В разделе «Сервисы» предоставлены возможности использования различных вариантов представления цифровых геопространственных данных с использованием современных онлайн сервисов, таких как ArcGIS.com Map и Google Earth, в виде файлов для настольных приложений ArcMap или ArcGIS Explorer или в виде интерфейса программирования приложений ArcGIS JavaScript API (рис. 2.5).

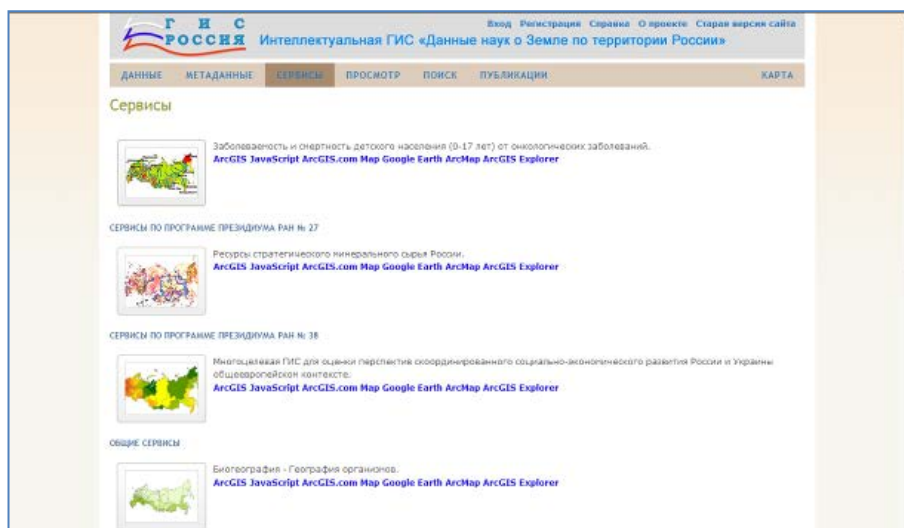


Рисунок 2.5 – Раздел «Сервисы». Имеется выбор вариантов представления данных

В разделе «Просмотр» также имеется доступ ко всем опубликованным картографическим сервисам. В разделе «Поиск» реализована возможность интерактивного поиска по всем сервисам геопортала. В разделе «Публикации» перечислены основные опубликованные работы, подготовленные в ходе работы над системой. В разделе «Карта» можно вызывать из базы данных и просматривать цифровые слои геолого-геофизической информации, просматривать метаданные, создавать свои собственные цифровые слои путем использования ресурсов геопортала, сохранять и выводить их на печать, измерять площадь и длину объектов, получать их координаты, делать собственные комментарии в виде закладок и др.

2.6. Выполнение функций Национального геофизического комитета РАН (НГК РАН). Общие итоги деятельности НГК РАН

В 2014 г. были проведены заседания всех секций НГК РАН, на которых рассмотрены основные научные результаты, проекты и международные мероприятия International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), а также подведены итоги работы в 2014 г. Основное внимание было уделено началу подготовки к 26-й Генеральной ассамблее Международного геодезического и геофизического союза. Важным вопросом является начало подготовки четырехлетних национальных отчетов о деятельности научных секций Комитета.

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

Развитие технологий электронных публикаций направлено на дальнейшее развитие разработанных ранее современных методов и инструментов отображения и публикации динамического и интерактивного научного контента.

Разработан пакет PROGCRAС для трансляции материалов электронной книжной серии «Труды по геоинформатике», издаваемой ГЦ РАН, обеспечивающий генерацию PDF-версий публикуемых материалов с одновременной генерацией XML-метафайлов для регистрации в системе CrossRef.

Разработан новый LaTeX-класс ELXPAPER, обеспечивающий трансляцию статей для журналов ГЦ РАН и максимально адаптированный к конверсии статей в формат электронных книг EPUB3. Пакет также обеспечивает автоматическую генерацию XML-метаописаний для включения в фонды Национальной научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

Выполнен не запланированный ранее большой объем работ по подготовке метаописаний всех статей, ранее опубликованных в «Российском журнале наук о Земле» с начала его издания (1998 г.) и загрузке его в eLIBRARY.RU. По материалам разработки опубликована статья [16]. Подготовлена и направлена заявка в Роспатент на регистрацию объекта интеллектуальной собственности.

Разработана новая версия программного комплекса конверсии исходных текстов в LaTeX2e к формату электронных книг EPUB3, что делает доступными публикации статей не только на десктопах, но и на портативных устройствах, таких как iPad, iPhone, смартфонах на базе Android и эмуляторах типа AZARDI и др.

Подготовлен проект технического задания на создание в ГЦ РАН на базе Мирового центра данных по солнечно-земной физике современной системы регистрации, публикации и цитирования геофизических данных с присвоением цифрового идентификатора объекта DOI (Digital Object Identifier). В качестве регистрационного агентства будет использоваться система CrossRef. Данный проект базируется на рекомендациях, разрабатываемых Группой публикации данных Мировой системы данных Международного совета по науке (ICSU-WDS Working Group on Data Publication) и рядом других групп, в которых формулируется и развивается современный подход к документированию научного контента. Получение новых данных не может более рассматриваться как некая вспомогательная деятельность, а становится важнейшей задачей геоинформатики. Данные следует считать полноценными результатами исследований, которые, будучи использованы при создании научного продукта, подлежат цитированию так же, как и другие научно-исследовательские источники информации, такие как журналы, статьи, книги и т.п. [17]. Ведется разработка пользовательских интерфейсов. Будет сформирована база метаданных, включающая подробное описание самих данных, информацию о производителе данных и публикаторе данных.

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

Разработаны информационные технологии интерактивной визуализации информации из базы данных МЦД на многофункциональном программно-аппаратном демонстрационном комплексе со сферическим экраном (ПО «ORBUS», написанное на языке C++), включая возможность подготовки данных к визуализации. В качестве объектов, выводимых

мых на сферический экран, могут выступать текстовые надписи, векторные объекты, изображения, видео, бегущая строка и пр., что позволяет создавать презентации любого уровня сложности. Программное средство также позволяет демонстрировать различные анимации, представляющие либо изменение покрытия, либо изменение объектов на глобусе, что важно для создания полноценных видеопрезентаций. Создание анимаций позволяет визуализировать процессы, происходящие на Земле. В этом случае в качестве объектов могут выступать как данные полученные с космоснимков о передвижении воздушных масс, данные мониторинга цунами, информация о выбросах в атмосферу, так и модельные данные о строении литосферных плит, локализации месторождений полезных ископаемых и многое другое. Таким образом, можно наблюдать за формированием ураганов, локацией землетрясений и др., в том числе в режиме реального времени, в случае подключения демонстрационного комплекса к сети Интернет.

Разработаны 3D-технологии в области сферических визуализаций. Изображение выводится сразу на 2 экрана (рис. 2.6).

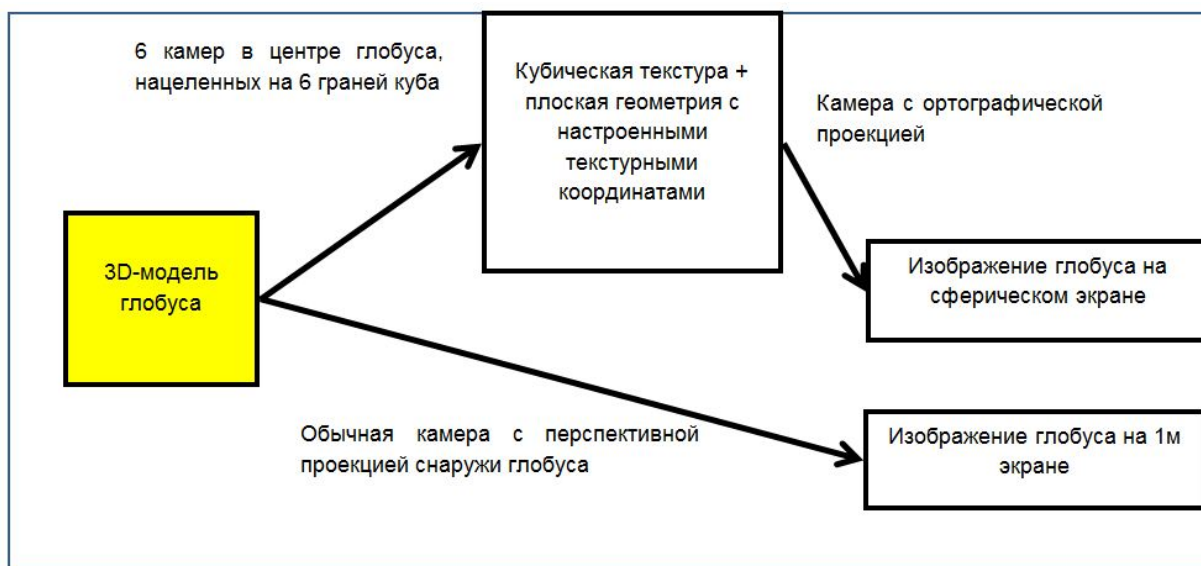


Рисунок 2.6 – Схема вывода изображений на 2 экрана

Изображения на обоих экранах синхронизируются между собой так, чтобы изображение на передней части сферического экрана выглядело идентично изображению глобуса в перспективной проекции.

Разработана база данных изображений для сферической визуализации, адаптированная под ПО «ORBUS». Проведена каталогизация имеющихся изображений, создан отдельный каталог сферических презентаций, включающий в себя тематически подобранные изображения, наборы изображений и видео. Проведена интеграция каталогизированных изображений в многоуровневую структуру базы данных для корректного их отображения на сферическом экране с помощью ПО «ORBUS».

Список публикаций по результатам проекта¹

Статьи в журналах

- Савиных В. П., Быков В. Г., Карпик А. П., Молдобеков Б., Побединский Г. Г., Демьянов Г. В., **Кафтан В. И.**, Малкин З. М., Стеблов Г. М. Организация международной комиссии по региональной земной геодезической основе Северо-восточной Евразии // Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле». 2014. № 1/2. С. 16–25. Импакт-фактор РИНЦ 0,869.
- Родников А. Г., Забаринская Л. П., Сергеева Н. А.** Глубинное строение сейсмоопасных регионов Земли (о. Сахалин) // Вестник ОНЗ РАН. 2014. Т. 6. NZ1001. 8 С. doi:10.2205/2014NZ000121.
- Сергеева Н. А., Шестопалов И. П., Забаринская Л. П., Нисилевич М. В.**, Згуровский М. З., Болдак А. А., Ефремов К. В. Исследование связи активности Солнца и сейсмической активности Земли с помощью вейвлет-преобразования // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. Т. 23. № 1. С. 27–34. Импакт-фактор РИНЦ 0,184.
- Shestopalov I. P., Kharin E. P.** Relationship between solar activity and global seismicity and neutrons of terrestrial origins // Russian Journal of Earth Sciences. 2014. V. 14. ES1002. 10 P. doi:10.2205/2014ES000536. Импакт-фактор РИНЦ 0,696.

Свидетельства о государственной регистрации

- № **2014618293** «Программа визуализации данных для сферических экранов Орбус (Orbus)». Авторы: **Рыбкина А. И., Бобков А. Е., Никифоров В. И., Пятыгина О. О.** Заявка № 2014616042 от 24.06.2014 г. Дата гос. регистрации в Реестре баз данных 14 августа 2014 г.

Список использованных источников

1. **Sergeyeva N. A., Zabarinskaya L. P., Krylova T. A., Nisilevich M. V.** Rescue of historical scientific data in the World Data Center for Solar-Terrestrial Physics // International Conference on Data Sharing and Integration for Global Sustainability (SciDataCon2014). 2–5 November 2014. New Delhi, India. 2 P.
2. **Sergeyeva N., Nisilevich M., Shestopalov I., Krylova T., Ishkov V.** The Activities of the World Data Center for Solar-Terrestrial Physics, Moscow, Russia. 2012–2014 // Poster presentation. WDS Members' Forum, 2.11.2014, New-Delhi, India.
3. **Sergeyeva N., Zabarinskaya L., Nisilevich M., Rodnikov A.** The Activities of the World Data Center for Solid Earth Physics, Moscow, Russia. 2012–2014 // Poster presentation. WDS Members' Forum, 2.11.2014, New-Delhi, India.
4. Куницын А. В., Пийп В. Б. Строение коры Баренцево-Карского региона по данным детальных исследований методом глубинного сейсмического зондирования // Вестник МГУ, серия геологическая. 2008. № 3. С. 55–63.

¹ Здесь и далее выделены фамилии сотрудников ГЦ

5. Пийп В. Б., Родников А. Г. Глубинные структуры континентальной окраины Приморье – Японское море по сейсмическим данным // Вестник МГУ, серия геологическая. 2009. № 2. С. 61–67.
6. 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». М.: МГУ, 2015.
7. Родников А. Г., Забаринская Л. П., Рашидов В. А., Сергеева Н. А. Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин. М.: Научный мир, 2014. 172 с.
8. Сергеева Н. А., Шестопалов И. П., Забаринская Л. П., Нисилевич М. В., Згуровский М. З., Болдак А. А., Ефремов К. В. Исследование связи активности Солнца и сейсмической активности Земли с помощью вейвлет-преобразования // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 1. Выпуск 23. С. 27–34.
9. Шестопалов И. П., Кужевский Б. М., Харин Е. П. Корреляция потоков нейтрино с сейсмичностью Земли. Гипотеза о возможности образования нейтрино в период сильных глубинных землетрясений // Инженерная физика. 2014. № 1. С. 4–12.
10. Artemjev M. E., **Kaban M. K.**, Kucherinenko V. A., Demjanov G. V., Taranov V. A. Subcrustal density inhomogeneities of Northern Eurasia as derived from the gravity data and isostatic models of the lithosphere // Tectonophysics. 1994a. V. 240. P. 249–280.
11. Artemjev M. E., **Kaban M. K.** Density inhomogeneities, isostasy and flexural rigidity of the lithosphere in the Transcaspian region // Tectonophysics. 1994b. V. 240. P. 281–297.
12. **Kaban M. K.** Gravity Model of the North Eurasia Crust and Upper Mantle: 1. Mantle and Isostatic Residual Gravity Anomalies // Russian Journal of Earth Sciences. 2001. V. 3. No 2. P. 143–163.
13. **Kaban M. K.** A gravity model of the north Eurasia crust and upper mantle: 2. The Alpine-Mediterranean fold belt and adjacent structures of the southern former USSR // Russian Journal of Earth sciences. 2002. V. 4. No. 1. P. 19–33.
14. Stolk W., **Kaban M.**, Beekman F., Tesauro M., Mooney W. D., Cloetingh, S. A. P. L. High resolution regional crustal models from irregularly distributed data: Application to Asia and adjacent areas. // Tectonophysics. 2013. V. 602. P. 55-68. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.01.022
15. Tesauro M., **Kaban M.**, Cloetingh S. EuCRUST-07: A new reference model for the European crust. // Geoph. Res. Let. 2008. V. 35. doi:10.1029/2007GL032244
16. **Нечитайленко В. А.** Технологии документирования научного контента. I. Онлайновый журнал // Исследования по геоинформатике. Труды Геофизического центра РАН. 2014. Т. 2. Вып. BS2003. С. 1–8. doi:10.2205/2014BS015
17. **Лукьянова Р. Ю.** Включение обсерваторских данных в систему цитирования DOI // Вестник ОНЗ РАН. 2013. Т. 5. 6 С. NZ9001. doi:10.2205/2013NZ000120

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

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

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

В рамках данной темы НИР в 2014 году были решены следующие три научные задачи.

3.1. Разработка алгоритма и программы расчета напряженно-деформированного состояния пластинчатых структурных блоков геологической среды, обусловленных вертикальными перемещениями

Для прогнозирования нелинейных геодинамических процессов при строительстве пунктов подземной изоляции РАО (ПГЗРО) особенно ценными являются данные инструментальных наблюдений. В этой связи возникает задача использования данных высокоточного геодезического нивелирования для прогнозирования напряженного состояния верхнего слоя земной коры, в котором собственно и будут находиться подземные выработки ПГЗРО. Цель работ состояла в разработке алгоритма и программного модуля для расчета напряженно-деформированного состояния верхней части земной коры, идеализированной в виде пластины, на основе использования вертикальных смещений по границам участка, которые могут быть получены на основе высокоточных геодезических наблюдений.

Исследования велись в тесном контакте с учеными Горного института НИТУ «МИСиС» в рамках НОЦ «Геодинамика и геоэкология недр: моделирование, прогноз и мониторинг». Идея проиллюстрирована на рис. 3.1, где показана схема, поясняющая принципы геодинамического районирования территории по трем категориям в зависимости от напряжений. Как видно, задачей моделирования становится выявление опасных зон в массиве горных пород, в которых возникает концентрация напряжений, обусловленная характером изменения граничных прогибов. Моделирование осуществлялось с помощью разработанного проблемно-ориентированного вычислительного комплекса, написанного на языке Фортран.

Для проверки разработанного алгоритма была выполнена верификация с помощью программы расчета значений прогиба и изгибающих моментов в 121 точке квадратной пластины. В качестве теста был выбран участок Нижнеканского массива, на границе которого задавались характерные прогибы, моделируемые посредством синусоидального закона.

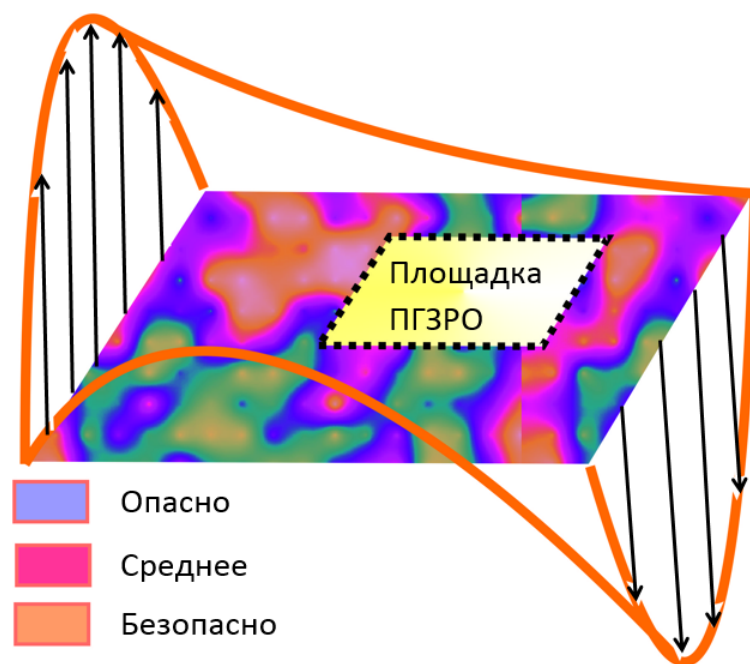


Рисунок 3.1 – Использование расчетов НДС в пластинчатых блоках при заданных вертикальных смещениях

Тестовые расчеты производились со следующими целями:

- 1) проверить правильность полученного решения;
- 2) исследовать сходимость решения при увеличении числа точек;
- 3) исследовать влияние учета угловых точек.

На рис. 3.2 приведены модели, для которых выполнялись тестовые расчеты. Результаты практически совпадают (незначительное различие обусловлено ошибками округления при суммировании конечных сумм решения). Сравнение результатов свидетельствует о том, что неучет угловых точек дает неправильные результаты, что связано с расходимостью соответствующих спектральных разложений, которые имеют сильную особенность в угловых точках.

В случае учета угловых точек явление Гиббса для граничной функции практически устраняется, а производные не имеют сильных особенностей, что приводит к хорошим результатам, соответствующим физическим представлениям.

На рис. 3.3–3.6 показаны объемные модели точного решения для первой модели. На рис. 3.3 приведены смещения, рис. 3.4 – изгибающий момент M_X , рис. 3.5 – изгибающий момент M_Y . На рис. 3.6 приведена объемная диаграмма распределения величины M_X для граничной функции прогибов. Для остальных вариантов объемные модели очень похожи ввиду незначительного расхождения в несколько процентов, поэтому не приводятся.

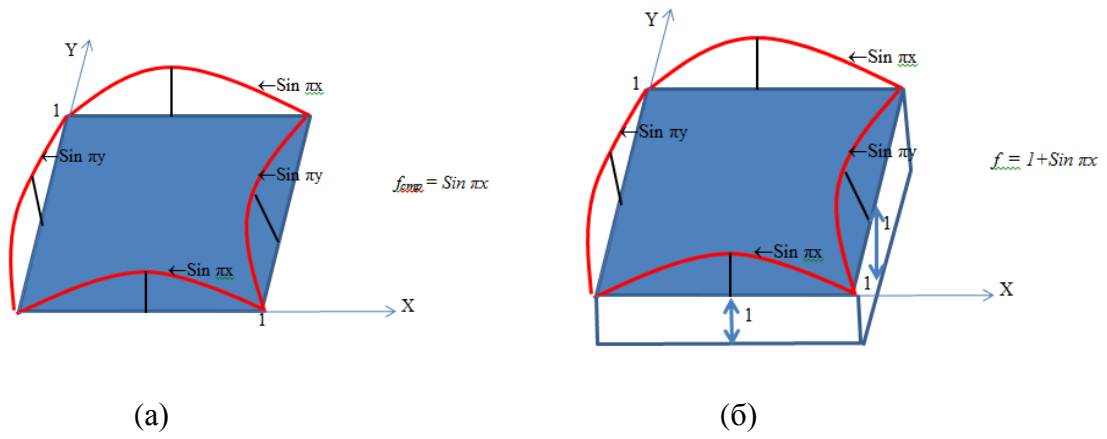


Рисунок 3.2 – Модель 1 тестового расчета: точное решение (а), приближенное решение (б)

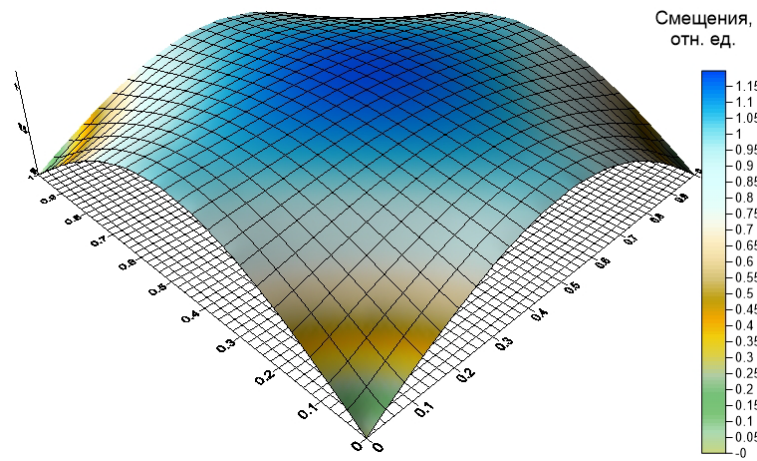


Рисунок 3.3 – Смещения для точного решения

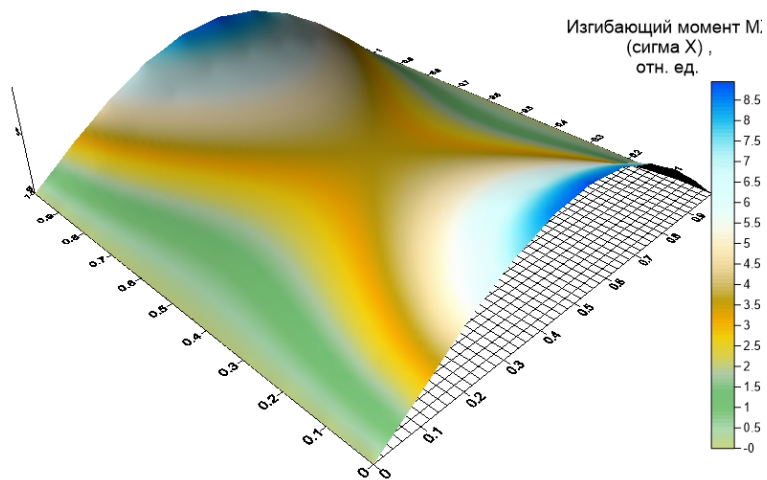


Рисунок 3.4 – Изгибающий момент M_X (сигма X) для точного решения

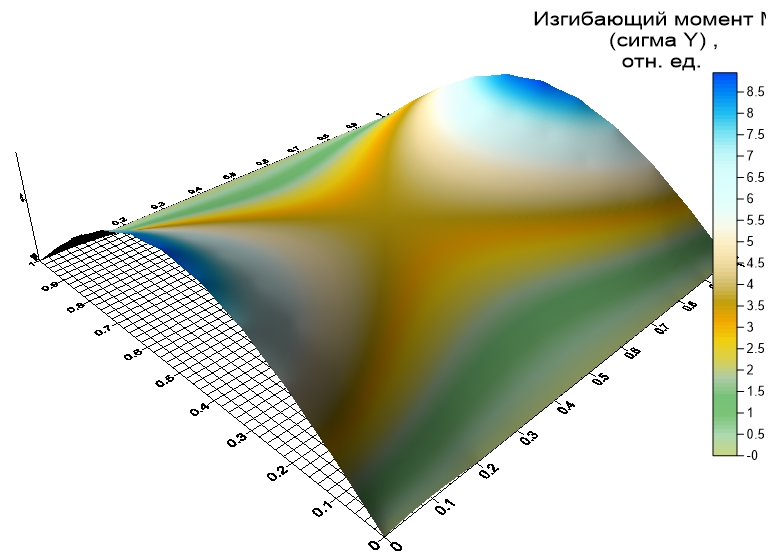


Рисунок 3.5 – Изгибающий момент M_Y (сигма Y) для точного решения

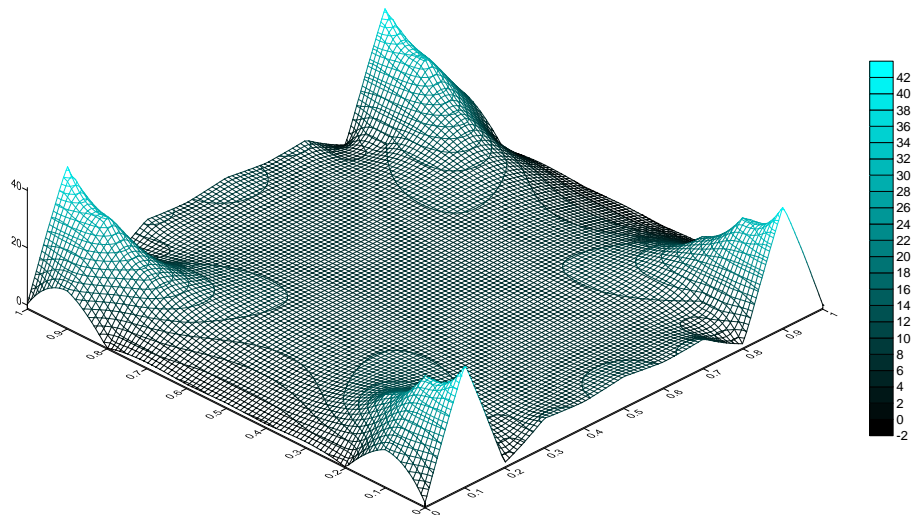


Рисунок 3.6 – Объемная диаграмма распределения величины M_X для граничной функции прогибов

В итоге в явном аналитическом виде было получено приближенное решение задачи изгиба тонкой прямоугольной пластины Кирхгофа от действия заданных прогибов точек контура в граничных узлах. Число граничных узлов вдоль каждой стороны пластины выбирается в зависимости от гладкости граничной функции прогибов: там, где эта функция изменяется наиболее быстро (например, в случае возможных осцилляций, которые проявляются при воздействии внезапных скачкообразных внешних воздействий, например, сейсмических) это число может быть достаточно большим, в отличие от ситуации плавного изменения граничных прогибов, когда достаточно ограничиться малым числом узлов вдоль соответствующей стороны пластины.

3.2. Выполнение третьего цикла GPS-наблюдений за современными движениями земной коры на геодинимическом полигоне ФГУП «ГХК»

Наблюдения за современными движениями земной коры (СДЗК) в районе были начаты в 2010 г. В июне 2014 г. был выполнен очередной цикл наблюдений. По результатам 4-х эпох наблюдений было выполнено уравнивание сети и проведена кинематическая обработка данных.

В результате уравнивания наблюдений с использованием программного пакета MAGNET Office Tools были получены уравненные компоненты векторов базовых линий и оценки их точности – средние квадратические ошибки (СКО). При уравнивании не использовались опорные значения координат. Такая сеть в геодезической литературе именуется нуль-свободной. При этом на поправки в неизвестные координаты накладывается условие минимума суммы их квадратов $[\delta X^2] = \min$. В результате получены уравненные компоненты векторов базовых линий и СКО. Результаты приведены на рис. 3.7.

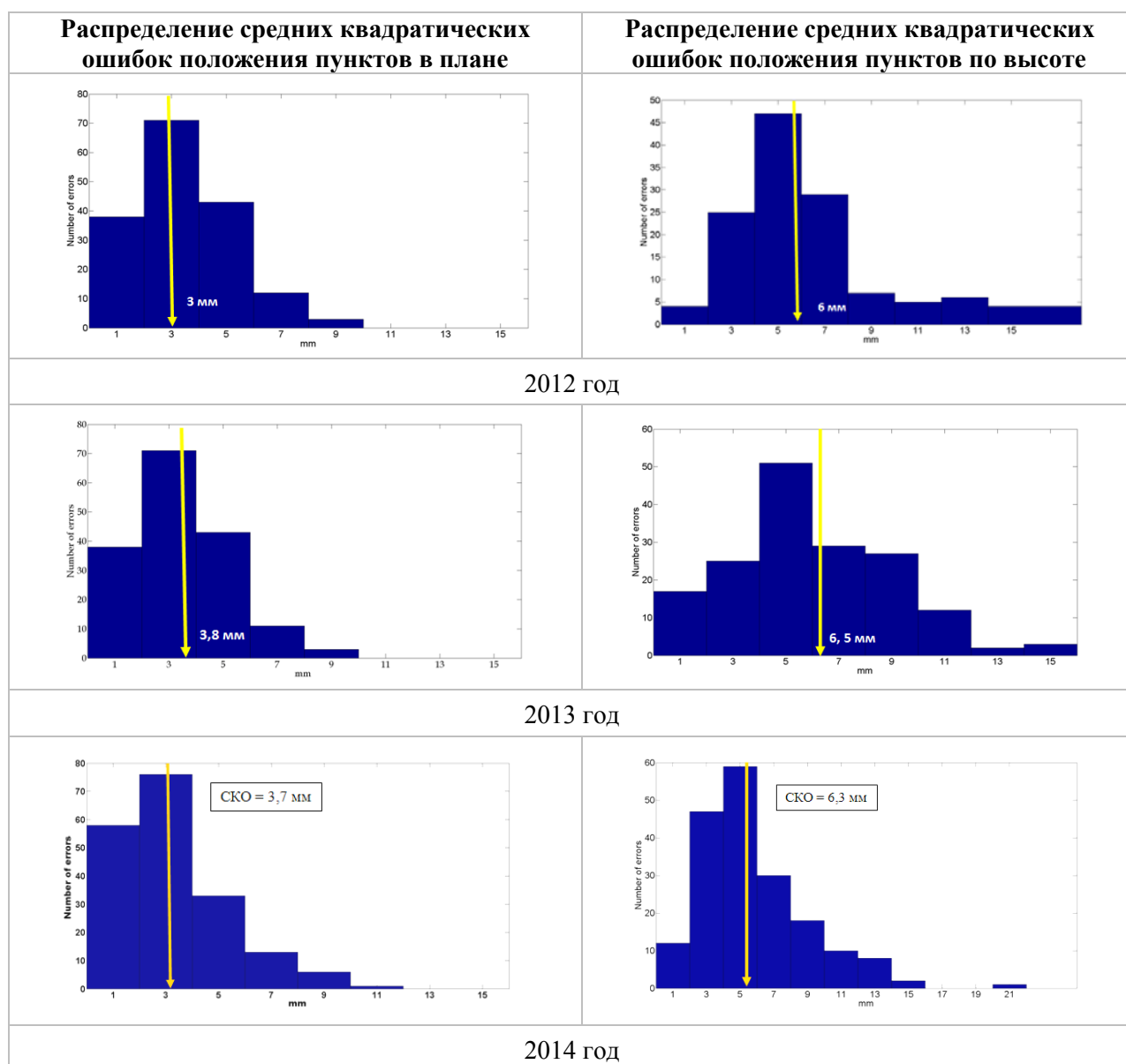


Рисунок 3.7 – Результаты уравнивания геодинимической сети и оценки СКО

Визуальный анализ гистограммы распределения разностей длин базовых линий (рис. 3.7) показывает преобладание отрицательных разностей над положительными. Медиана гистограммы смещена в область отрицательных значений. Средняя разность составляет – 1,3 мм. Средняя квадратическая погрешность полученной средней разности равна 0,5 мм, нормированное значение средней разности $t = -2,6$. Пользуясь таблицей квантилей распределения Стьюдента, получим для выборки 100 и более значений (в нашем случае $k = 103$) критическое значение 2,6259 при доверительной вероятности $P = 0,99$. Так как полученная оценка t практически достигает критического значения, можно отклонить гипотезу об отсутствии значимых деформаций с доверительной вероятностью 0,99.

Полученную обобщенную оценку -2,6 можно отождествить с общей тенденцией *деформации сжатия территории* во временном интервале с 2012 по 2013 гг.

В 2010, 2012, 2013 гг. максимальные изменения длин базисов не превышали 10–11 мм, а в период 2013–2014 г. резко возросло количество базисов, для которых изменения длин лежат в интервале от 10 до 20 мм.

Оценка СКО положения пунктов в плане для эпохи 2014 г. показала, что основная масса группируется в области 3 мм. Средние значения СКО в плане и по высоте составили 3,7 и 6,3 мм, соответственно. Результаты аналогичного уравнивания для эпохи 2013 г. показали, что средние значения СКО в плане и по высоте составляли приблизительно такие же величины – 3,9 и 6,6 мм, соответственно. В 2012 г. – 3,0 и 6,0 соответственно. Таким образом, очевиден вывод, что относительно высокие изменения длин базисов, полученные в 2014 г., вызваны природными причинами, а не помехами или возможными техническими ошибками в выполнении наблюдений или расчетов.

На всей правобережной части района длины базовых линий за период с 2010 по 2013 год уменьшались, т.е. имела тенденция к сжатию верхней части геологической среды, а в левобережной части, наоборот, почти все линии увеличили свою длину, т.е. среда испытывала растяжение. Через год (рис. 3.8) картина полностью сменилась на противоположную. На правом берегу зарегистрированы растяжения почти для всех линий, а на левом – сжатие среды.

В качестве объяснения этого факта можно предположить, что это следствие циклического развития природных процессов в регионе, и оно является ярким подтверждением фундаментальных закономерностей геодинамических процессов, неоднократно установленных в различных (активных и платформенных) регионах земного шара. Именно в период 2013–2014 гг. произошел очередной цикл активизации тектонического режима территории.

Этот вывод согласуется с хорошо известными геоморфологическими особенностями региона. Енисейский кряж четко делит территорию на две провинции – спокойную левобережную и воздымающуюся правобережную. В этом случае становится особенно важным и 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.

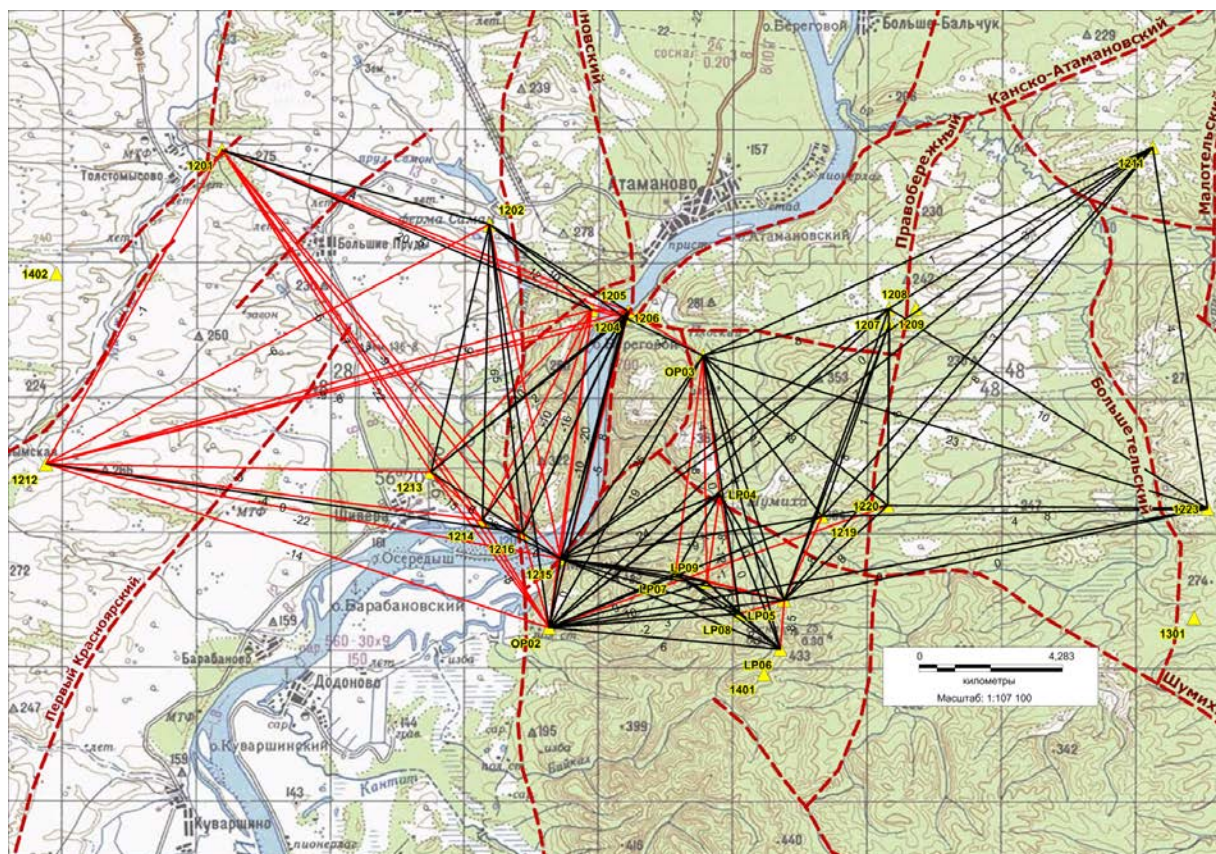


Рисунок 3.8 – Изменения длин базисных линий за 2013–2014 гг. Черный цвет – длина линий не изменилась или увеличилась (растяжение), красный цвет – длина линий уменьшилась (сжатие)

На рис. 3.9 показан поперечный разрез с востока на запад, на котором показано развитие геодинамической обстановки в районе Енисейского кряжа, объясняющий данные наблюдений за СДЗК. Независимо от причин, которые можно обсуждать, совершенно очевидна современная тектоническая активность Муратовского (и, возможно, Правобережного) разлома, так как именно по его границам происходит смена направленности изменения длин базисов двух тектонических районов.

Необходимо дальнейшее накопление информации. Более обоснованные выводы о возможности подземной изоляции РАО в этом регионе будут возможны при зарегистрированных скоростях СДЗК, как минимум превышающих паспортную точность метода. Необходим также комплексный анализ данных о горизонтальных движениях, полученных на основе применения GPS/ГЛОНАСС-систем, с результатами повторного нивелирования и других геолого-геофизических методов исследования.

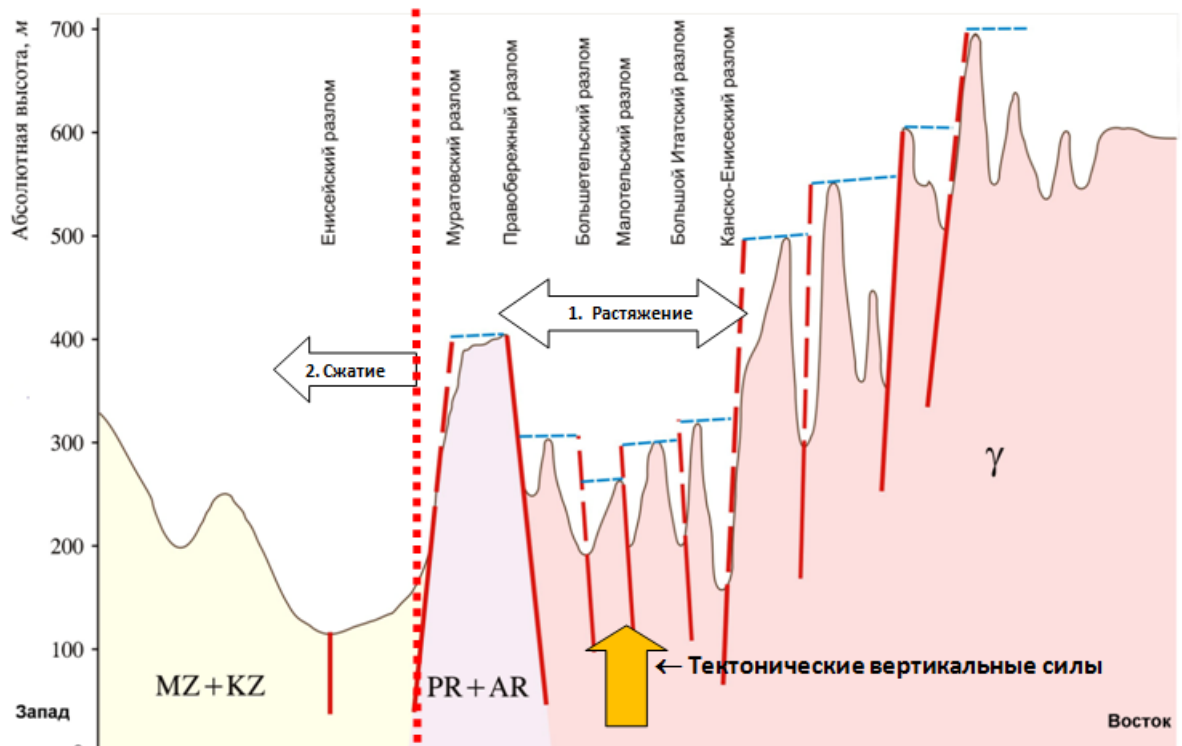


Рисунок 3.9 – Геодинамическая обстановка в районе Енисейского кряжа на основе наблюдений за СДЗК в 2010–2014 гг. (вертикальный масштаб сильно увеличен по отношению к горизонтальному). Коричневая линия – рельеф, красная – активные разломы, голубой пунктир – позднеплиоценовая поверхность выравнивания. Красная пунктирная линия – граница двух тектонических районов: Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы

3.3. Разработка инновационной методологии выделения перспективных площадей при поисково-разведочных работах на нефть и газ

В настоящее время имеются веские основания считать, что локализация углеводородов (УВ) в осадочном чехле ряда нефтяных провинций связана с абиогенным происхождением нефти и газа, поступающим из глубин кристаллического фундамента. Примером локализации углеводородов в кристаллическом фундаменте является месторождение нефти во Вьетнаме, Мексиканском заливе, Бразилии и др. Поиск промышленных залежей углеводородов связан с использованием широкого комплекса геолого-геофизических методов исследований, завершающихся бурением скважин, достигающих глубин 6–7 км. Бурению предшествуют площадные геофизические исследования, равномерно покрывающие предполагаемую перспективную территорию (на региональном уровне более 10^4 – 10^5 км²), с последующим выделением зон (на локальном уровне 10^2 – 10^3 км²) и поиском «ловушек», перспективных на локализацию промышленных скоплений углеводородов.

Исходя из геологических предпосылок, можно считать общепринятой концепцию промышленной локализации углеводородов, связанную с зонами разгрузки (тектонической деструкции), как в породах фундамента, так и осадочного чехла.

При этом предполагается, что разломная тектоника определяет региональную систему каналов вертикальной и горизонтальной фильтрации углеводородных флюидов в земной коре, формирующих промышленные запасы нефти и газа. В этой связи была разработана новая методология выделения перспективных участков на нефть и газ, по результатам моделирования напряженно-деформированного состояния геологической среды и процесса фильтрации газожидких флюидов в блочных гетерогенных структурах, нарушенных системой тектонических разломов (шовных зон и др.), открывающая новые перспективы в выявлении потенциально возможной локализации углеводородов в поле современных тектонических напряжений. Подробно принципы работы методологии представлены в наших статьях. Эффективность методологии апробирована на ряде примеров ретроспективного поиска промышленных месторождений нефти и газа, в том числе на нефтяных месторождениях Канадской провинции Британская Колумбия.

На рис. 3.10 представлена тектоническая карта северо-восточной части провинции Британская Колумбия, построенная по данным 3D сейсморазведки и аэромагнитной съемки высокого разрешения.

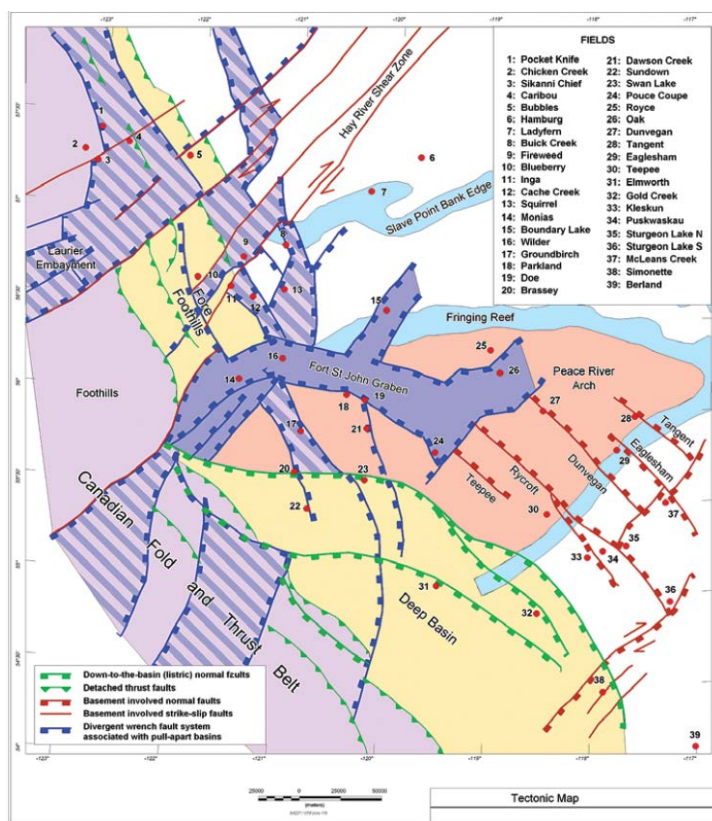


Рисунок 3.10 – Тектоническая схема северо-востока Британской Колумбии, Канада

Доминирующим направлением тектонических сил является ось сжатия СВ–ЮЗ направления, что следует из анализа механизма очагов землетрясений. В модели напряженно-деформированного состояния этого района Канады эти предпосылки использованы в качестве базовых, с последующим расчетом возможных векторов фильтрации УВ в верхней части кристаллического фундамента под действием градиентных полей тектонических напряжений.

Карта интенсивности тектонических напряжений и векторов скоростей фильтрации представлена на рис. 3.11. Красными квадратами на карте обозначены основные нефтяные поля региона. Из карты видно, что они в основном попадают в зоны низких значений тектонических напряжений, что соответствует геологической концепции о локализации углеводородов в зонах разгрузки тектонических напряжений. Применение новой методологии позволяет существенно сократить затраты на геофизические исследования и повысить эффективность дорогостоящих буровых работ.

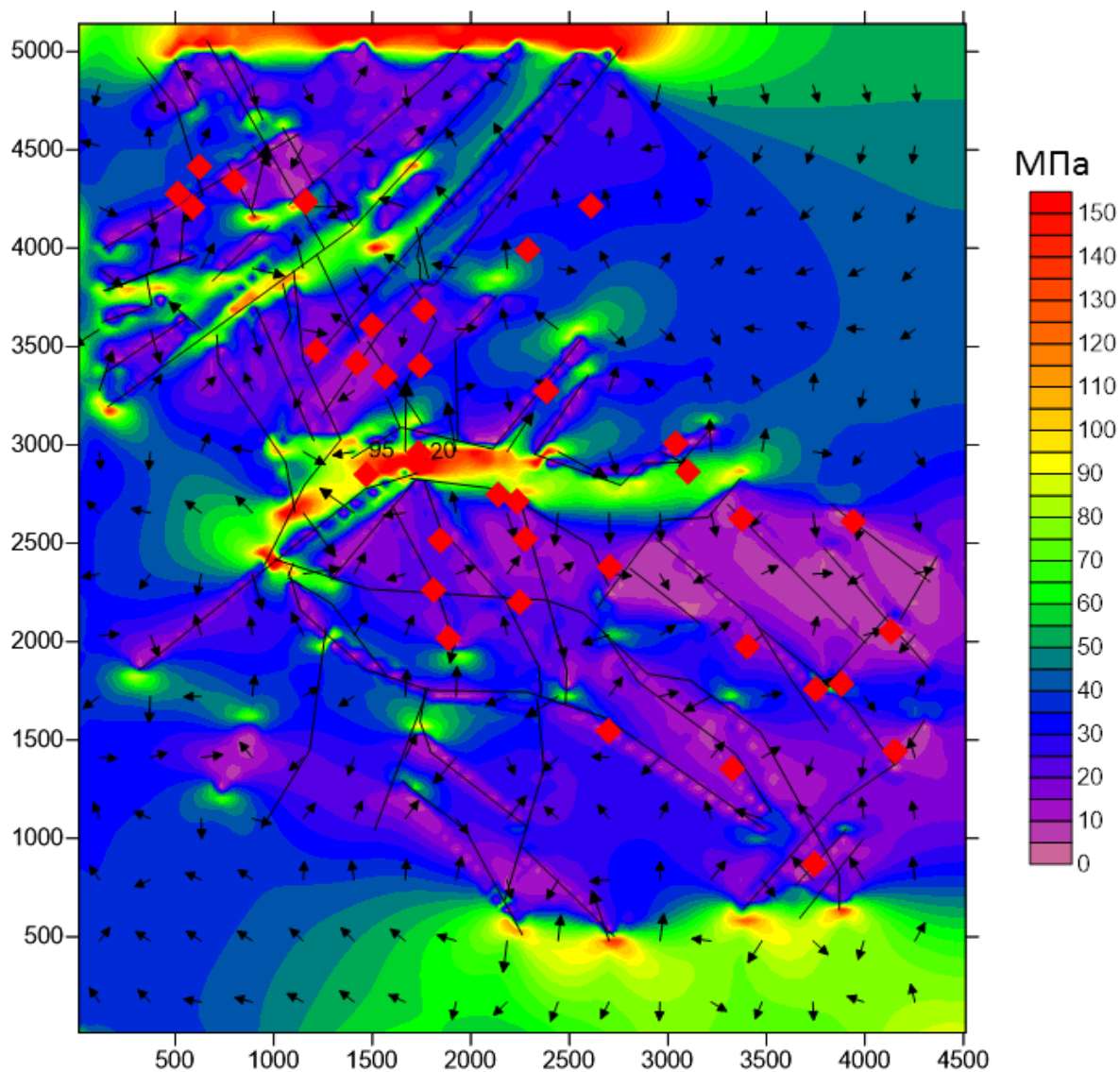


Рисунок 3.11 – Карта интенсивности напряжений северо-востока Британской Колумбии

Список публикаций по результатам проекта

Статьи в журналах

- Морозов В. Н., Каган А. И.** К прогнозу локализации залежей углеводородов в центральных и шельфовых районах Камчатки // Недропользование XXI век. 2014. № 5. С. 48–54. Журнал из списка ВАК.
- Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Каган А. И.** Моделирование напряжений и направлений фильтраций подземных вод при выборе участков для подземной изоляции радиоактивных отходов // ГИАБ. 2014. № 6. С. 243–249. Импакт-фактор РИНЦ 0,053.
- Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Кафган В. И., Каган А. И.** Геодинамический мониторинг как основа сохранения биосферы при захоронении радиоактивных отходов // Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле». 2014. № 3. С. 47–60. Импакт-фактор РИНЦ 0,869.
- Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Колесников И. Ю., Каган А. И.** Кинематический метод геодинамического районирования при проектировании отработки месторождений подземным способом // Безопасность жизнедеятельности. 2014. № 7. С. 8–11. Импакт-фактор РИНЦ 0,138.
- Татаринов В. Н., Морозов В. В., Колесников И. Ю., Каган А. И., Татарина Т. А.** Устойчивость геологической среды как основа безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива // Надежность и безопасность энергетики. 2014. № 1(24). С. 25–29. Импакт-фактор РИНЦ 0,085.

Свидетельства о государственной регистрации

- Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2014621300 «База данных по напряженно-деформированному состоянию района подземной изоляции радиоактивных отходов в пределах Нижнеканского массива (Красноярский край). «DATABASE STRESS AND DISPLACEMENTS НКМ». Авторы: **Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Каган А. И.** Заявка № 2014620837 от 24.06.2014 г. Дата гос. Регистрации в Реестре баз данных 15 сентября 2014 г.
- Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2014621299 «База данных по геологической среде Нижнеканского массива (Красноярский край) «Database on geological environment НКМ». Авторы: **Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Колесников И. Ю., Каган А. И.** Заявка № 2014620836 от 24.06.2014 г. Дата гос. Регистрации в Реестре баз данных 15 сентября 2014 г.

4. Развитие и сопровождение интерактивного ресурса данных по солнечно-земной физике SPIDR

Номер гос. регистрации № 01201252859 (0145-2014-0003)

Руководитель: в.н.с., к.ф.-м.н. М. Н. Жижин

Основной задачей данной темы НИР является разработка современных методов, обеспечивающих непрерывное устойчивое функционирование сети взаимодействующих баз данных, а также приложений, реализующих, в частности, вычислительные модели околоземной среды и космической погоды. В качестве приложения использовалась созданная ранее сеть синхронных баз данных космической погоды SPIDR, позволяющая выбирать и визуализировать исторические научные данные в сети Интернет. В настоящее время узлы SPIDR уже установлены в России, США, Японии, Китае, и на Украине. Программное обеспечение и базы данных системы разрабатываются совместно Национальным центром геофизических данных Национальной администрации по океанам и атмосфере (NOAA) США и Геофизическим центром РАН. Исходные коды программ и данные системы обмена данными открыты и свободно распространяются в сети Интернет через Мировые центры данных.

Узел системы реализуется на компьютерном кластере и обеспечивает параллельный поиск, обработку и визуализацию больших объемов данных с применением методов искусственного интеллекта и нечеткой логики. Каждый сервер приложений имеет интерфейс управления кластером баз данных, который позволяет выполнять модификацию данных удаленным пользователям с правами администратора по сети Интернет. Узлы системы автоматически обмениваются обновлениями баз данных и программного обеспечения.

Существенное увеличение отказоустойчивости, масштабируемости и гибкости каждого узла в отдельности и системы в целом может быть достигнуто при использовании современных компьютерных технологий облачных вычислений.

4.1. Аппаратное обеспечение

Аппаратной основой работ по теме стало создание комплекса распределенных вычислений, объединяющего географически распределенные и, вообще говоря, разнородные вычислительные ресурсы. Для проведения исследований был использован управляющий сервер, расположенный в ГЦ РАН, и вычислительный кластер в Институте физики Земли (ИФЗ) РАН. Назначение управляющего сервера состоит в организации доступа к данным узла SPIDR, распределении заданий между узлами распределенной вычислительной системы и сборе результатов обработки данных из системы. В общем случае, такого рода управление ресурсами не требует существенных вычислительных мощностей и объемов памяти, что и обусловило использование единичного сервера для администрирования системы.



Рисунок 4.1 – Корзина с серверами (вверху) и система хранения (внизу)

В то же время выполнение запросов и проведение расчетов, наоборот, требует привлечения значительных вычислительных мощностей. Для обеспечения функционирования системы был использован современный вычислительный кластер, состоящий из шести блейд-серверов и системы хранения данных (рис. 4.1), размещенный в Институте физики Земли РАН.

4.2. Виртуализация

Для обеспечения максимальной гибкости системы мы использовали технологию виртуализации, являющуюся одной из компонент облачных технологий. Использование виртуальных машин позволяет более гибко распределять ресурсы между пользователями, сервисами, приложениями. Применительно к научным исследованиям, в которых, как правило, отсутствуют непрерывно функционирующие сервисы, и требуется запуск различных задач, виртуализация существенно упрощает обслуживание и настройку системы. Для каждой задачи достаточно настроить свою виртуальную машину, с последующим клонированием необходимого количества экземпляров.

На серверах установлена свободно распространяемая операционная система Linux, дистрибутив CentOS 6 от компании RedHat. Каждый из серверов является платформой (или «хост-машиной») для виртуальных серверов, эмулирующих поведение реальных машин с использованием части ресурсов платформы (рис. 4.2). Мы использовали менеджер виртуальных машин KVM (или Kernel-based Virtual Machine), работающий под управлением libvirt – свободной кросс-платформенной библиотеки управления виртуализацией.

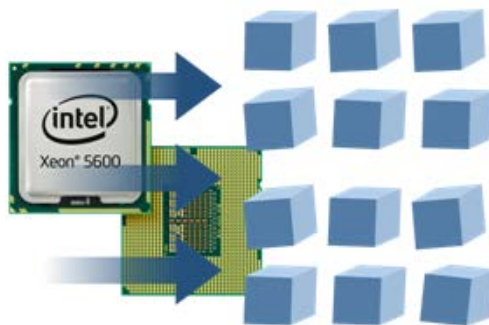


Рисунок 4.2 – Иллюстрация технологии виртуализации

Технология виртуализации, используемая в данной работе, практически не снижает производительность процессора. Это достигается за счет использования аппаратного ускорения виртуализации, в частности технологий VT-x и Extended Page Tables (EPT), которые позволяют работать виртуальной машине практически без потерь в производительности.

4.3. Промежуточное программное обеспечение

Одной из целей проводимых исследований является адаптация расчетов, необходимых для решения геофизических задач, для слабо связанных вычислительных систем (ССВС). В отличие от локальных вычислений на суперкомпьютере, ССВС подразумевают значительную неоднородность вычислительных модулей и относительно большое время обмена между ними. Для управления распределенными системами создано и развивается специализированное, так называемое, промежуточное программное обеспечение (ППО). Название связано с тем, что оно является, по сути, надстройкой над операционной системой, позволяющей автоматизировать параллельные вычисления. Наиболее простой в плане инфраструктуры ССВС является вычислительный кластер – группа компьютеров, объединенных высокоскоростным каналом связи. Дальнейшее объединение ресурсов приводит к необходимости использования глобальной сети Интернет для организации совместных вычислений. Это, с одной стороны, существенно снижает скорость обмена между узлами, а, значит, сужает круг решаемых задач. С другой стороны, использование соответствующего ППО позволяет объединить существенно неоднородные вычислительные ресурсы. Такого рода ССВС получили название грид, от английского «grid» – решетка.

4.4. Грид-инфраструктура

Средства грид-инфраструктуры для поддержки вычислительных веб-сервисов включают в себя: удостоверяющий центр, хранилище реквизитов, файловое хранилище, метапланировщик, веб-интерфейс, а также службу запуска и контроля задач, локального менеджера вычислительных ресурсов, а также локального планировщика задач (последние три – на каждый вычислительный кластер). Ниже перечислены основные решения, принятые при реализации проекта.

Удостоверяющий центр представляет собой набор инструментов для поддержки инфраструктуры открытых ключей (Public key infrastructure, PKI) для обеспечения аутентификации и авторизации пользователей и сервисов в грид. В настоящей реализации используется набор инструментов от проекта OpenSSL (The OpenSSL Project).

Хранилище реквизитов. В грид на основе инструментария Globus Toolkit для процессов аутентификации и авторизации пользователей и сервисов используются не пользовательские сертификаты, а так называемые прокси-сертификаты. Создание прокси-сертификата инициируется пользователем или сервисом грид. При этом происходит генерация

новой пары ключей, после чего создается соответствующий сертификат, подписанный ключом пользователя. Прокси-сертификат имеет ограниченный срок действия и может использоваться командами и сервисами грид для выполнения действий от имени пользователя без ввода пароля. Для доступа к сертификатам пользователей для последующей генерации прокси-сертификатов используется сервис MyProxy. Для его использования Globus Toolkit содержит специальный набор команд.

Файловое хранилище. Для размещения данных и доступа к ним применяется протокол GridFTP. GridFTP – это расширение протокола передачи данных FTP, с переработанной системой контроля доступа и рядом других значительных улучшений. Безопасность GridFTP основана на средствах Globus Security Interface, которые, в свою очередь, опираются на прокси и X.509-сертификаты. Сервер GridFTP расположен на сервере ГЦ.

Метапланировщик. Метапланировщик осуществляет распределение вычислительных заданий между ресурсными центрами грид в целях балансировки нагрузки и оптимизации времени вычислений. Метапланировщик позволяет также оценивать время выполнения задач на вычислительных узлах на основе информации о динамике выполнения и классе задачи.

Служба запуска и контроля задач. Каждый вычислительный кластер является обособленным комплексом и может иметь инфраструктуру, как программную, так и аппаратную, отличную от других кластеров в грид. Для унификации процедур запуска и контроля выполнения в кластере настраивается программное обеспечение-посредник – грид-шлюз. Его задача – прозрачно оттранслировать контрольные и информационные сигналы между Globus Toolkit и локальными средствами контроля и запуска, а также передача необходимых для выполнения задания файлов.

Локальный менеджер вычислительных ресурсов. Задачи в вычислительном кластере выполняются и останавливаются по сигналам от локального менеджера вычислительных ресурсов. Это ПО работает только в пределах определенного кластера и обеспечивает непосредственный запуск и отслеживание вычислительных программных процессов. Система управления ресурсами управляет вычислительной нагрузкой путем предотвращения возникновения «гонки» за ограниченные вычислительные ресурсы. Обычно система управления ресурсами состоит из собственно менеджера ресурсов, а также планировщика задач. В качестве кластерного ППО нами был использован сервер TORQUE/PBS (Portable Batch System, переносимая система очередей). При выборе мы исходили из простоты установки и эксплуатации. Torque собирается на головных машинах каждого кластера с явным указанием сервера по умолчанию, генерируются пакеты для вычислительных узлов, которые затем распространяются и устанавливаются.

В параметрах серверной части Torque задается как минимум одна очередь и указываются все вычислительные узлы, в свою очередь на вычислительных узлах в конфигурационные файлы вносятся директивы для совместимости с общей файловой системой.

Проведенные работы создали аппаратную и программную основу для перехода на поддержку узла SPIDR с помощью распределенной вычислительной системы. Созданная система облачных вычислений может быть, с одной стороны, легко клонирована для

установки в других узлах сети. С другой стороны, созданная система допускает при необходимости существенное наращивание мощности. Наконец, разработанное решение также пригодно для совместного использования с несколькими узлами сети.

Список публикаций по результатам проекта

Статьи в журналах

Жижин М. Н., Крис Э., **Пойда А. А.**, Годунов А. И., Велихов В. Е., Ерохин Г. Н., Алсынбаев К. С., Брыксин В. М. Использование данных ДЗЗ для мониторинга добычи углеводородов // Информационные технологии и вычислительные системы. 2014. № 3. С. 97–111. Импакт-фактор РИНЦ 0,46.

Отчет по результатам проекта

По результатам выполнения НИР в 2012–2014 г. подготовлен, сдан и размещен на сайте ФГАНУ ЦИТиС отчет. Регистрационный номер ИКРБС № 215020970016.

5. Разработка и внедрение методов дискретного математического анализа для изучения состояния геомагнитной активности и контроля качества магнитных данных

Номер гос. регистрации № 01201252857 (0145-2014-0004)

Руководитель: зам. директора по науке, зав. лаб., д.ф.-м.н. А. А. Соловьев

В ходе выполнения НИР в 2014 году были получены следующие результаты:

1. Осуществлена программно-алгоритмическая реализация методов дискретного математического анализа для автоматизированного, формализованного и единообразного распознавания аномальных событий техногенной природы (скачков и дрейфа базового уровня) на минутных, секундных и полусекундных магнитограммах, зарегистрированных наземными обсерваториями и искусственными спутниками Земли. Разработаны методы оценки эффективности распознавания техногенных аномалий на множестве магнитограмм;
2. Разработаны и внедрены методы визуализации результатов геомагнитного мониторинга для Российского центра геомагнитных данных;
3. Проведен обзор методов фильтрации наблюдений геомагнитного поля. Сформулированы задачи фильтрации наблюдений главного магнитного поля Земли;
4. Проведены магнитометрические полевые исследования на двух участках северной части острова Сахалин.

5.1. Разработка методов и алгоритмов распознавания скачков на магнитограммах

5.1.1. Описание алгоритма JM (JUMP)

Неформальная логика

Неформальная логика, лежащая в основе поиска скачков на записи, может быть описана следующим образом: «Скачок – аномалия на записи, приводящая к смещению ее уровня». По аналогии с целью исследования будем называть соответствующий алгоритм JM, сокращенно от JUMP – скачок (англ.).

В основе алгоритма JM лежит нечеткая мера скачкообразности (рис. 5.1), представляющая собой функционал исходной записи с областью значений от 0 до 1. Большие значения этого функционала соответствуют резкому изменению уровня исследуемой записи, а их выбор происходит с использованием нечетких сравнений.

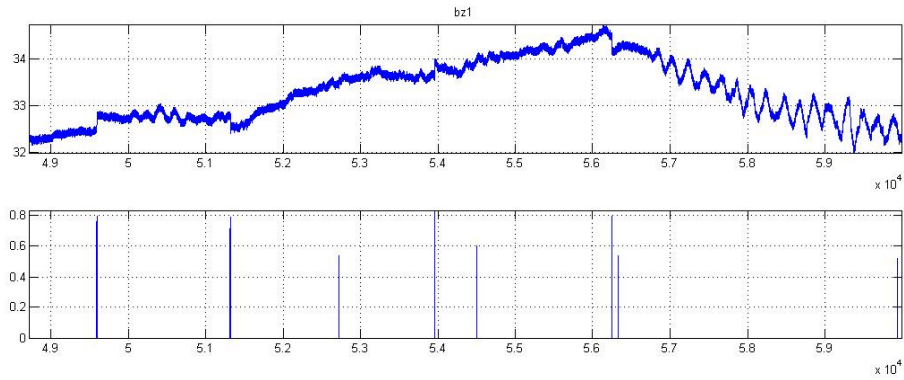


Рисунок 5.1 – На верхнем графике приведен фрагмент исследуемой записи компоненты Vz, на нижнем – соответствующий график меры скачкообразности

Для построения меры скачкообразности нами было введено понятие нечетких границ. На рис. 5.2, 5.3 показаны нечеткие грани первых пяти и трех порядков.

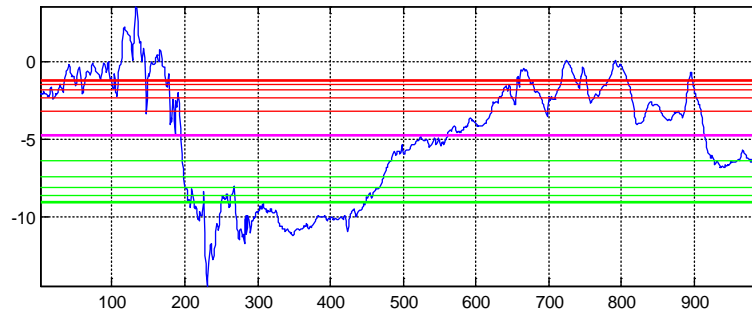


Рисунок 5.2 – Пример вычисления нечетких верхней и нижней границ при $k = 0, \dots, 5$. При $k = 0$ нечеткая верхняя и нижняя грань показана фиолетовым цветом, в остальных случаях верхняя – красным, нижняя – зеленым

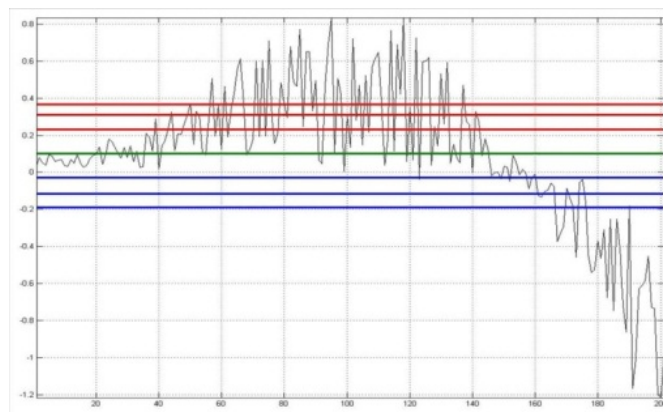


Рисунок 5.3 – Нечеткие грани первых трех порядков. При $k = 0$ нечеткая верхняя и нижняя грань показана зеленым цветом, в остальных случаях верхняя – красным, нижняя – синим

Нечеткие грани с разной степенью жесткости позволяют определять наиболее характерный разброс значений числового множества A . Разницу $W_k(A) = S_k^+(A) - S_k^-(A)$ естественно назвать стохастической шириной A k -го порядка. Ширина $W_k(A)$ гибко отображает обычное статистическое отклонение $\sigma(A) = \sqrt{d(A)}$.

Конкретная реализация алгоритма JM определяется выбором следующих свободных параметров:

$\Delta \in \mathbf{R}_h^+$ – параметр локального обзора алгоритма FCARS,

$\Lambda \in \mathbf{R}_h^+$ – параметр глобального обзора,

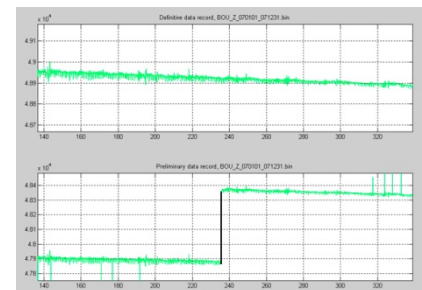
$\alpha \in [0.9, 1]$ – уровень сильной вертикальной аномальности в алгоритме FCARS,

$\beta \in [0.5, 1]$ – уровень скачкообразности аномалии.

Два примера работы алгоритма JM на магнитных записях ИНТЕРМАГНЕТ приведены на рис. 5.4.



(a)



(б)

Рисунок 5.4 – Пример выделения скачков (черный цвет) на предварительных записях ИНТЕРМАГНЕТ (внизу) и сравнение результатов с записями, прошедшими ручной контроль качества экспертами (вверху): фрагмент записи компоненты Y на обсерватории BOU (а), фрагмент записи компоненты Z на обсерватории BOU (б)

5.1.2. Распознавание скачков базовой линии на спутниковых магнитограммах

Геостационарные спутники наблюдения окружающей среды (GOES) вращаются вокруг Земли по геосинхронной орбите со скоростью, соответствующей скорости вращения Земли. Это позволяет им непрерывно наблюдать за одной и той же позицией на поверхности Земли. Получаемые с помощью GOES данные, которые являются очень точными и используются для краткосрочного прогнозирования, распространяются Национальной информационной службой спутниковых данных об окружающей среде (NESDIS) по целому ряду действующих научно-исследовательских центров. Сегодня эти данные используются очень большим числом пользователей: Национальной метеорологической службой США, коммерческими центрами погоды, университетами и мировым научно-

исследовательским обществом. На спутнике GOES помимо метеорологических измерений осуществляется регистрация магнитных данных. Они представляют собой вариации трех компонент магнитного поля, зарегистрированных двумя векторными магнитометрами с частотой 2 Гц. Эти данные характеризуются большим количеством скачков базовой линии. В большинстве случаев причиной скачков являются автоматические включения и отключения нагревательных систем, сопровождающих каждый магнитометр. Таким образом, задача фильтрации спутниковых данных во многом связана с устранением скачков базовой линии. Ситуация осложняется тем, что в большинстве случаев скачки настолько малы, что их весьма трудно распознать визуально. Для этой цели был разработан алгоритм *JM* (от JUMP), позволяющий в автоматизированном режиме единообразно распознавать скачки на магнитограммах со спутника GOES.

Апробация алгоритма осуществлялась на суточных магнитограммах трех компонент магнитного поля (B_x , B_y , B_z), полученных спутником GOES-15 3 апреля 2010 г. Магнитограммы также сопровождалась двумя записями о статусе {0, 1, 2, 3} нагревателей с частотой 1 значение в 5 мин (S_1 и S_2). Статус 0 соответствует выключенному состоянию обоих нагревателей, статус 1 – включенному состоянию первого нагревателя, 2 – включенному состоянию второго нагревателя, 3 – включенному состоянию обоих нагревателей (рис. 5.5).

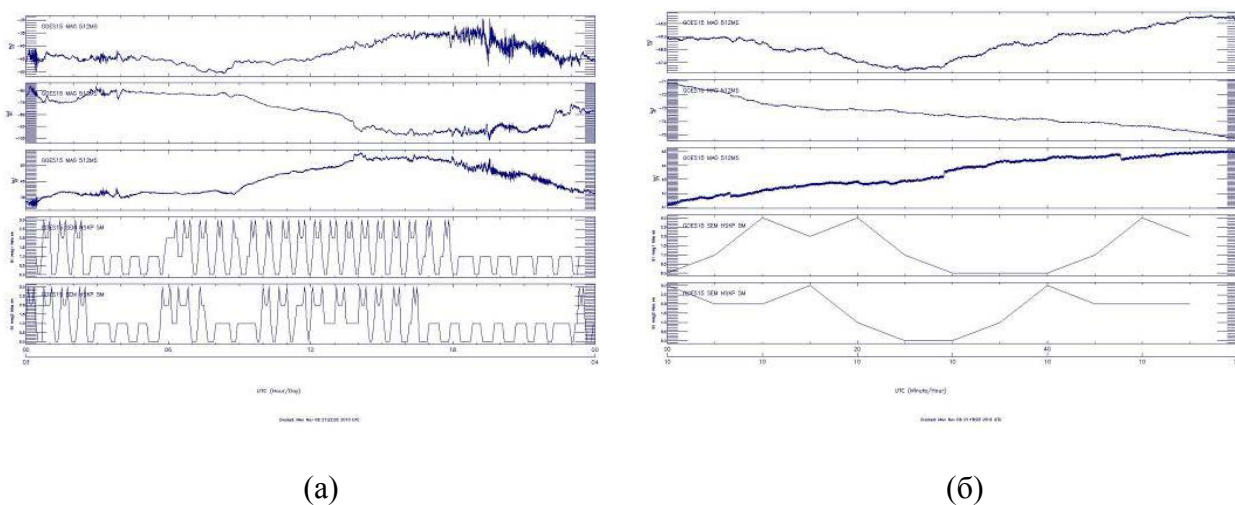


Рисунок 5.5 – Фрагмент магнитограмм и записей статуса нагревателей на спутнике: в масштабе часов (а), в масштабе минут (б)

В результате применения алгоритма *JM* к данным за 3 апреля 2010 г. были распознаны практически все скачки. Стоит отметить, что в большинстве случаев скачки на глаз не различимы, что видно из рис. 5.6 и 5.7. На рис. 5.6 показан часовой фрагмент исходной записи, рассчитанная мера скачкообразности и график состояния нагревателей.

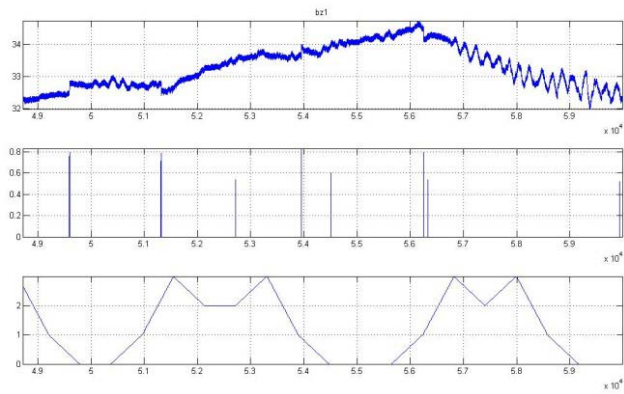


Рисунок 5.6 – Иллюстрация фрагмента исходной записи (сверху), рассчитанной для него меры скачкообразности (посередине) и состояния нагревателей (снизу)

Примеры работы алгоритма приведены на рис. 5.7.

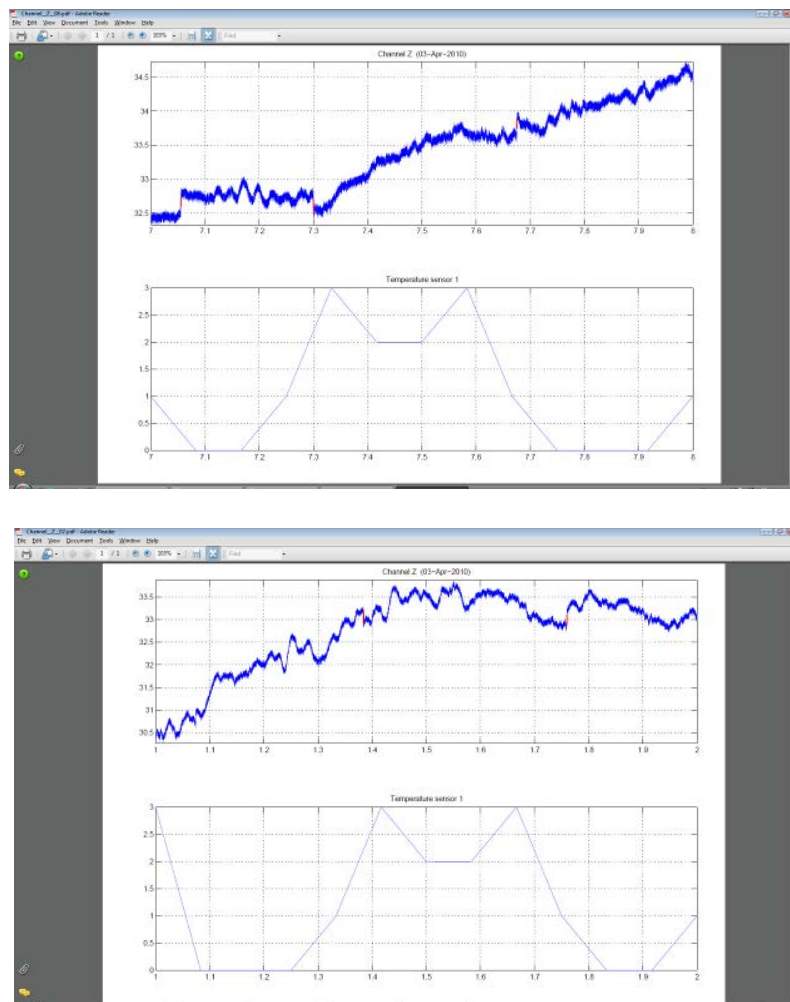


Рисунок 5.7 – Примеры работы алгоритма JM. Распознанные скачки выделены красным цветом

5.2. Разработка алгоритма распознавания дрейфа базового уровня в магнитограммах

В момент времени t на записи $y|_{T(t)}$, $T(t) = \{\bar{t} \in T : \bar{t} \leq t\}$ алгоритм FCARS обнаружил аномалию $A_t = y|_{[c(t), d(t)]}$, $d(t) \leq t$. Если аномалия A_t достаточно «свежая»: $t - d(t) < \Lambda$, то ждем момента $d(t) + \Lambda$ для решения вопроса о существовании в A_t скачка $\bar{J}(A_t) = [a(t), b(t)]$. Допустим, что он существует. Но скачок – результат смещения (дрейфа) записи. Возникает вопрос о начале (зарождении) такого смещения.

Ищем его циклом по \bar{t} влево от начала скачка $c(t)$. Итак, в качестве уже начала смещения, завершившегося скачком $y|_{[a(t), b(t)]}$, предлагается $\bar{t} < c(t)$. Далее с помощью алгоритма FCARS изучается стыковка фрагмента $y|_{[\bar{t}-\Delta, \bar{t}]}$ с фрагментом $A_t = y|_{[d(t), d(t)+\Delta]}$. Стыковка имеет место (точка \bar{t} «хорошая»), если выпрямление $F_{\bar{y}}(\bar{t} | \Delta)$ объединения $\tilde{y} = y|_{[\bar{t}-\Delta, \bar{t}] \cup [d(t), d(t)+\Delta]}$ в месте стыка $[\bar{t}, d(t) + h]$ будет вертикально фоновым: $F_{\bar{y}}(\bar{t} | \Delta) < \alpha_s$, где α_s – сильный уровень вертикальной аномальности в алгоритме FCARS. Началом смещения считается точка $t^* + h$, где t^* ближайшая к $c(t)$ хорошая точка. Таким образом, само смещение представляет собой фрагмент записи $y|_{[t^*+h, a(t)]}$. На рис. 5.8 представлен пример выделения дрейфа на магнитограмме.

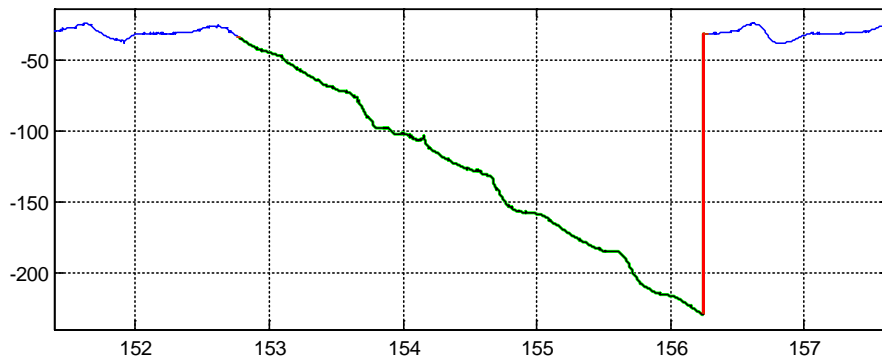


Рисунок 5.8 – Пример выделения дрейфа

5.3. Разработка метода оценки эффективности распознавания техногенных аномалий на множестве магнитограмм

В качестве примера приведем описание метода оценки эффективности распознавания выбросов (спайков) алгоритмом SP .

Для проведения процедуры обучения алгоритма SP введем следующие обозначения:

$S = \{s_k\}$, $k = 1, 2, \dots$ – множество обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ;

$D = \{d_i\}$, $i = 1, \dots, 4$, $d_i \in \{X, Y, Z, F\}$ – множество компонент магнитного поля, измеряемых на обсерваториях ИНТЕРМАГНЕТ;

$y_{s,d}$ – компонента типа d , зарегистрированная обсерваторией s ;

$\psi(y_{s,d})$ – произвольный фрагмент временного ряда $y_{s,d}$, $\Psi(y_{s,d}) = \{\psi(y_{s,d})\}$ – множество всех таких фрагментов на записи $y_{s,d}$.

Обучающая выборка Ω определяется подмножествами $\bar{S} \subset S$ и $\bar{D} \subset D$ и представляет собой совокупность всех фрагментов всех записей $y_{s,d}$ с $s \in \bar{S}$ и $d \in \bar{D}$: $\Omega = \Omega(\bar{S}, \bar{D}) = \{\Psi(y_{s,d}) : s \in \bar{S}, d \in \bar{D}\}$. Элементы Ω будем обозначать через $\omega = \psi(y_{s,d})$, где $s \in \bar{S}$, $d \in \bar{D}$.

Определим показатель качества работы алгоритма $SP(\pi)$, $\pi = (\Delta, \Lambda, \alpha, \beta)$, на фрагменте ω . Пусть $A(\omega)$ – множество выбросов, найденных на фрагменте ω экспертом (эталонный результат распознавания), а $SP(\pi)(\omega)$ – множество выбросов, найденных на фрагменте ω алгоритмом $SP(\pi)$.

Обозначим через $K^1(SP(\pi)(\omega))$ вероятность ошибки первого рода (пропуск цели), т.е. того, что найденные на фрагменте ω экспертом выбросы пропущены алгоритмом $SP(\pi)$:

$$K^1(SP(\pi)(\omega)) = 1 - \frac{|A(\omega) \cap SP(\pi)(\omega)|}{|A(\omega)|}.$$

Обозначим через $K^2(SP(\pi)(\omega))$ вероятность ошибки второго рода (ложная тревога), т.е. того, что найденные на фрагменте ω алгоритмом $SP(\pi)$ выбросы не распознаны экспертом:

$$K^2(SP(\pi)(\omega)) = 1 - \frac{|A(\omega) \cap SP(\pi)(\omega)|}{|SP(\pi)(\omega)|}.$$

Общий критерий качества работы $K(SP(\pi)(\omega)) = K_\lambda(SP(\pi)(\omega))$ алгоритма $SP(\pi)$ на фрагменте ω представляет собой их λ -линейную комбинацию: если $0 \leq \lambda \leq 1$, то

$$K_\lambda(SP(\pi)(\omega)) = \lambda K^1(SP(\pi)(\omega)) + (1 - \lambda) K^2(SP(\pi)(\omega)).$$

Теперь можно определить критерий качества $K(SP(\pi)(\Omega))$ распознавания алгоритма $SP(\pi)$ на обучающей выборке Ω , как интегральный показатель Θ совокупности $K(SP(\pi)(\omega))$ по всем $\omega \in \Omega$:

$$K(SP(\pi)(\Omega)) = \Theta\{K(SP(\pi)(\omega)), \omega \in \Omega\}.$$

Вариантами соединения Θ могут быть:

Нечеткая дизъюнкция:

$$K(SP(\pi)(\Omega)) = \max\{K(SP(\pi)(\omega)), \omega \in \Omega\}$$

Среднее по Колмогорову Σ_r :

$$K(SP(\pi)(\Omega)) = \Sigma_r\{K(SP(\pi)(\omega)), \omega \in \Omega\} = \left(\frac{\sum_{\omega \in \Omega} K(SP(\pi)(\omega))^r}{|\Omega|} \right)^{1/r}, r > 0.$$

Нечеткое среднее Σ :

$$K(SP(\pi)(\Omega)) = \Sigma\{K(SP(\pi)(\omega)), \omega \in \Omega\} = \sup_{\gamma \in (0,1)} \left(\min \left(\gamma, \frac{|\omega \in \Omega : K(SP(\pi)(\omega)) \geq \gamma|}{|\Omega|} \right) \right).$$

Обучение алгоритма SP может происходить на выборках самой разной конфигурации, но самыми естественными представляются следующие уровни обучения:

$$\begin{cases} \Omega = \bar{S} \times D, & (\text{Глобальный уровень}) \\ \Omega = \bar{S} \times \bar{D}, & (\text{Уровень компоненты}) \\ \Omega = s \times D, & (\text{Уровень станции}) \\ \Omega = \omega, & (\text{Уровень фрагмента}) \end{cases}$$

Критерий $K(SP(\pi)(\Omega))$ при фиксированном множестве Ω является функцией от свободных параметров алгоритма SP $\pi = (\Delta, \Lambda, \alpha, \beta)$ и λ . Процесс обучения состоит в минимизации этой функции на некотором множестве параметров алгоритма, т.е. в получении наборов оптимальных свободных параметров алгоритма $SP(\pi^*)$ на Ω , $\pi^* \in \text{Arg min}(K(SP(\Delta, \Lambda, \alpha, \beta), \Omega))$. Имея эталонный результат распознавания экспертом, существует возможность оценивать эффективность алгоритмического распознавания путем вычисления критерия $0 \leq K_\lambda \leq 1$: чем меньше K_λ , тем эффективнее распознавание. Изменяя значение параметра λ , можно варьировать степень важности мнения эксперта (критерия K^1) по отношению к алгоритму SP (критерий K^2).

5.4. Разработка методов визуализации результатов геомагнитного мониторинга для российского центра геомагнитных данных

5.4.1. Веб-портал Центра геомагнитных данных

На базе созданных веб-сервисов для интерактивной работы с данными был опубликован онлайн веб-портал Российско-украинского центра геомагнитных данных. Он доступен по адресу <http://geomag.gcras.ru>. Веб-портал содержит всю необходимую информацию о функционировании Центра геомагнитных данных. Для пользователей веб-портал предоставляет полный доступ к геомагнитным данным, поступающим и хранящимся в Центре, благодаря разработанным веб-сервисам, интегрированным в работу веб-портала. Среди разделов веб-портала стоит отметить следующие:

1. «Data Products» – раздел интерактивного доступа к данным в графическом (рис. 5.9) и цифровом виде; в корне раздела содержится графическое представление магнитограмм за последние сутки, полученные из всех станций и обсерваторий;
2. «Observatories» – раздел с описанием всех станций и обсерваторий, обслуживаемых Центром; в корне раздела приведена интерактивная карта мира с возможностью выбора интересующей станции или обсерватории, а также справочная информация по всем станциям и обсерваториям с указанием временных интервалов доступных данных;
3. «Data Services» – раздел со службами по работе с данными, включая удаленную обработку пользовательских данных автоматизированной системой распознавания техногенных аномалий (спайков), подраздел для ввода результатов абсолютных измерений и подраздел доступа к абсолютным значениям компонент поля и значениям базовых линий в графическом и цифровом видах.

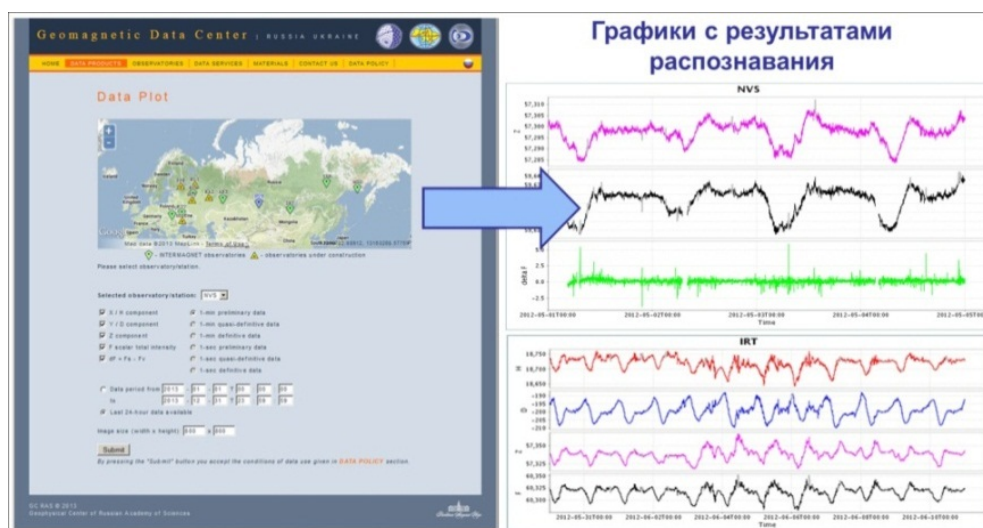


Рисунок 5.9 – Подраздел «Plot» веб-портала для доступа к геомагнитным данным. Для выбора интересующей обсерватории на странице имеется интерактивная карта мира. Результаты запроса к данным доступны как в цифровом, так и графическом видах и содержат информацию о распознанных техногенных аномалиях (справа выделены серым)

5.4.2. Видео-стенд для отображения геомагнитных данных

На видео-стенде, установленном в ГЦ РАН (рис. 5.10), отображаются геомагнитные данные по мере их поступления в Центр. Источником информации служат исходные файлы данных, присылаемые из обсерваторий и станций. Таким образом, видео-стенд функционирует независимо от работы базы данных и, тем самым, служит дополнительным индикатором работы всей системы в целом.



Рисунок 5.10 – Видео-стенд центра геомагнитных данных, установленный в ГЦ РАН

5.5. Обзор методов цифровой фильтрации наблюдений геомагнитного поля

Проведен обзор и анализ методов фильтрации наблюдений геомагнитного поля (ГМП), применяемых для существующей научно-технической практики. Кратко описаны особенности применения традиционных цифровых фильтров для наблюдений ГМП. Рассмотрены методы фильтрации наблюдений ГМП, основанные на регрессионном анализе; отдельно проанализированы нелинейные и линейные регрессионные модели. Существенное место в обзоре занимают методы фильтрации, использующие вейвлет-функции.

Произведен обзор публикаций реализованных задач фильтрации наблюдений ГМП по отечественным и зарубежным литературным источникам, благодаря чему предложено рассмотрение современных задач фильтрации наблюдений ГМП, которые на сегодня требуют решения.

5.6. Формирование общей постановки задачи аппроксимационной фильтрации наблюдений ГМП

Произведено формирование общей постановки задач аппроксимационной фильтрации наблюдений ГМП.

Реализована постановка задачи аппроксимационной фильтрации на последовательности локальных интервалов с использованием локальных аппроксимационных моделей. Предложены задачи фильтрации и на их основе задачи оценивания параметрических функций.

Предложена математическая технология скользящей аппроксимационной фильтрации и оценивания параметров наблюдений ГМП. Разработаны методы аппроксимационной сплайновой фильтрации, реализованные на полиномах общего вида и ортогональных полиномах. Реализована фильтрация на основе сплайнов с разрывами первых производ-

ных, использованная для аппроксимационного сглаживания наблюдений ГМП с джерками.

Рассмотрена постановка задачи аппроксимационной фильтрации наблюдений ГМП на основе совместной обработки наблюдений векторного и скалярного магнитометра, которая позволяет снизить погрешности оценок наблюдений ГМП.

5.7. Геомагнитные исследования на о. Сахалин

Состоялась экспедиция на о. Сахалин, в ходе которой были выполнены магниторазведочные исследования территории, планируемой под установку совместно с компанией Schlumberger геомагнитной обсерватории стандарта ИНТЕРМАГНЕТ. Целью экспедиции было определение участков, пригодных для строительства обсерваторского павильона. В результате экспедиции была проведена площадная магнитоградиентометрическая съемка в нескольких масштабах для многоуровневого исследования характера распределения аномалий магнитного поля на участках «Москальво» и «Пионер» (рис. 5.11). На каждом из участков была выбрана наиболее оптимальная площадь для строительства обсерватории и определены ее координаты.

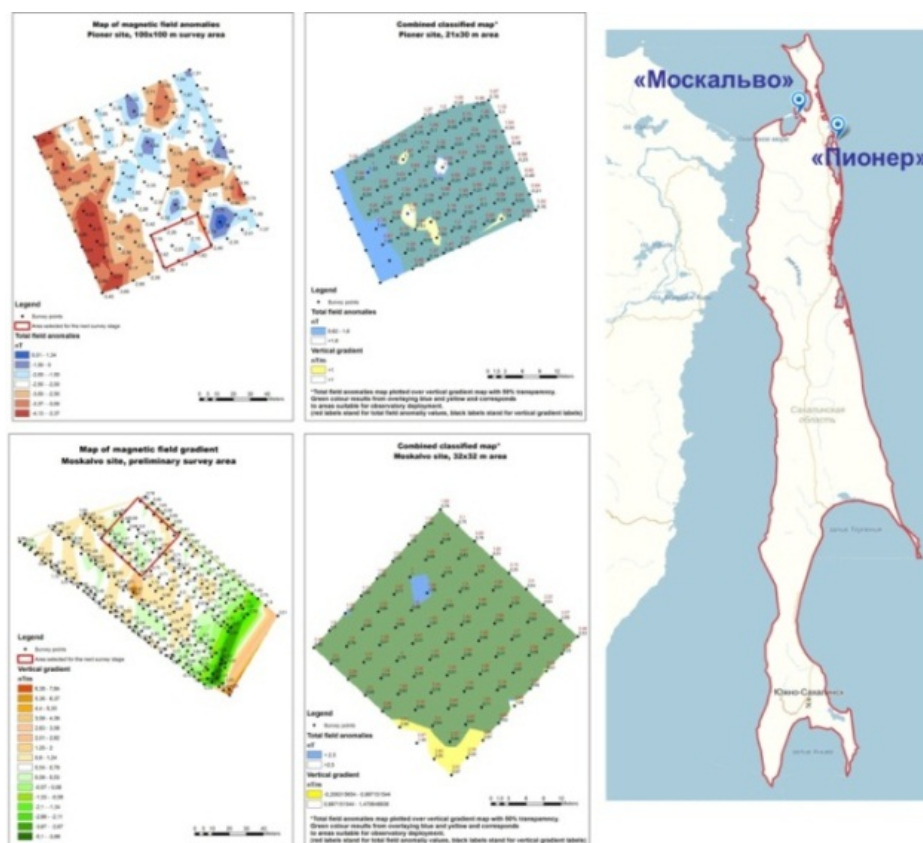


Рисунок 5.11 – Карта магнитных аномалий масштаба 10×10 м на участке «Пионер» (слева сверху), комбинированная карта результатов съемки аномальной составляющей и вертикального градиента поля масштаба 3×3 м на участке «Пионер» (посередине сверху), карта вертикального градиента масштаба ~6×6 м на участке «Москальво» (слева снизу), комбинированная карта результатов масштаба 4×4 м на участке «Москальво» (посередине снизу), расположение исследуемых участков на о. Сахалин (справа)

5.8. Выводы

Осуществлена программно-алгоритмическая реализация метода дискретного математического анализа (ДМА) для автоматизированного, формализованного и единообразного распознавания таких аномальных событий техногенной природы на наземных и спутниковых магнитограммах, как скачок и дрейф базового уровня. Разработанные алгоритмы обладают существенной адаптивностью и универсальностью в силу наличия свободных параметров. Разработанные алгоритмы связаны общей математической основой с использованием нечеткой логики и базируются на единой математической теории – ДМА. Это делает соответствующую алгоритмическую систему эффективным и универсальным инструментарием, позволяющим решать широкий круг геофизических задач, связанных с анализом временных рядов и распознаванием отраженных на них аномальных событий. Оптимизирована система обучения алгоритмов и создан формализованный метод оценки эффективности работы алгоритмов при их применении к множеству магнитограмм.

Разработаны методы визуализации результатов геомагнитного мониторинга и внедрены в работу Российского центра сбора и анализа геомагнитных данных.

Проведен обзор методов фильтрации наблюдений геомагнитного поля. В обзор вошли методы, основанные на традиционных цифровых фильтрах, регрессионном анализе, wavelet-функциях, а также специальные методы фильтрации геомагнитных наблюдений. Сформулированы задачи цифровой фильтрации наблюдений магнитного поля Земли.

Сформирована общая постановка задачи аппроксимационной фильтрации геомагнитных наблюдений. В частности, рассмотрены фильтрация с использованием локальных аппроксимационных моделей, скользящих локальных аппроксимационных моделей, аппроксимационная сплайновая фильтрация, наблюдения с джерками, а также аппроксимационная фильтрация на основе совместной обработки наблюдений векторного и скалярного магнитометров.

Проведена полевая магнитоградиентометрическая съемка двух участков на севере о. Сахалин. В результате выбраны оптимальные площадки для строительства павильонов будущей магнитной обсерватории.

Список публикаций по результатам проекта

Статьи в журналах

- Хохлов А. В.** Вековые геомагнитные вариации. методы статистики палеомагнитных направлений в осадочных породах // *Физика Земли*. 2014. № 4. С. 106–111. Импакт-факторы: РИНЦ 0,503; WoS 0,494; Scopus 0,376.
- Gvishiani A., Lukianova R., Soloviev A., Khokhlov A.** Survey of Geomagnetic Observations Made in the Northern Sector of Russia and New Methods for Analysing Them // *Surveys in Geophysics*. 2014. Vol. 35. № 5. P. 1123–1154. doi: 10.1007/s10712-014-9297-8. Импакт-факторы: WoS 5,112; Scopus 3,657.

Kozlovsky A., Shalimov S., **Lukianova R.**, Lester M. Ionospheric effects of the missile destruction on December 9, 2009 // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. 2014. Vol. 119. № 5. P. 3873–3882. doi:10.1002/2013JA019531. Импакт-факторы: WoS 3,440; Scopus 2,376.

Zelinskiy N. R., Kleimenova N. G., Kozyreva O. V., **Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R., Soloviev A. A.** Algorithm for recognizing Pc3 geomagnetic pulsations in 1-s data from INTERMAGNET equatorial observatories // *Izvestia-Physics of the Solid Earth*. 2014. Vol. 50. № 2. P. 240–248. Импакт-факторы: РИНЦ 0,503; WoS 0,494; Scopus 0,376.

Свидетельства о государственной регистрации

- Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2014620725 «База данных Российско-украинского центра геомагнитных данных». Авторы: Медведев Д. П., **Добровольский М. Н., Соловьев А. А.** Заявка № 2014620130 от 13.02.2014 г. Дата гос. регистрации в Реестре баз данных 21 мая 2014 г.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014613741 «Программа загрузки данных наблюдений компонент магнитного поля Земли в базу данных Российско-украинского центра геомагнитных данных». Авторы: Медведев Д. П., **Добровольский М. Н., Соловьев А. А.** Заявка № 2014611076 от 13.02.2014 г. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 04 апреля 2014 г.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014613651 «Программа доступа и визуализации данных наблюдений компонент магнитного поля Земли, хранящихся в базе данных Российско-украинского центра геомагнитных данных». Авторы: Медведев Д. П., **Добровольский М. Н., Соловьев А. А.** Заявка № 2014611025 от 13.02.2014 г. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 02 апреля 2014 г.

Отчет по результатам проекта

По результатам выполнения НИР в 2012–2014 г. подготовлен, сдан и размещен на сайте ФГАНУ ЦИТиС отчет. Регистрационный номер ИКРБС № 215020970014.

6. Разработка алгоритмов сглаживания динамических геофизических данных на базе дискретного математического анализа

Номер гос. регистрации № 01201252858 (0145-2014-0005)

Руководитель: гл.н.с., д.ф.-м.н. С. М. Агаян

В течение отчетного года на основе гравитационного сглаживания был разработан новый алгоритм выделения аномалий на магнитограммах, который, как представляется, удачно дополняет алгоритмы SP и SPs.

6.1. Сбои на записях сети ИНТЕРМАГНЕТ

Глобальная сеть геомагнитных наблюдений ИНТЕРМАГНЕТ на сегодняшний день насчитывает 144 обсерватории и 5 региональных центров обработки и распространения данных GIN (Geomagnetic Information Node), расположенных по всему миру (рис. 6.1). Ежегодно эксперты обсерваторий и центров осуществляют ручную обработку и фильтрацию накопленных сырых (предварительных – preliminary) данных, делая обработанные (окончательные – definitive) данные доступными мировому научному сообществу. Несмотря на тесное сотрудничество между обсерваториями, подходы к обработке данных могут отличаться и нести в себе субъективность оценки того или иного эксперта. Кроме того, даже у одного эксперта процесс обработки данных может меняться со временем, к примеру, с учетом усталости. В связи с этим математическая формализация распознавания временных возмущений могла бы способствовать существенному повышению качества окончательных данных ИНТЕРМАГНЕТ [1]. В свою очередь, повышение качества наблюдаемых магнитных данных внесет существенный вклад в наши знания о магнитном поле Земли.

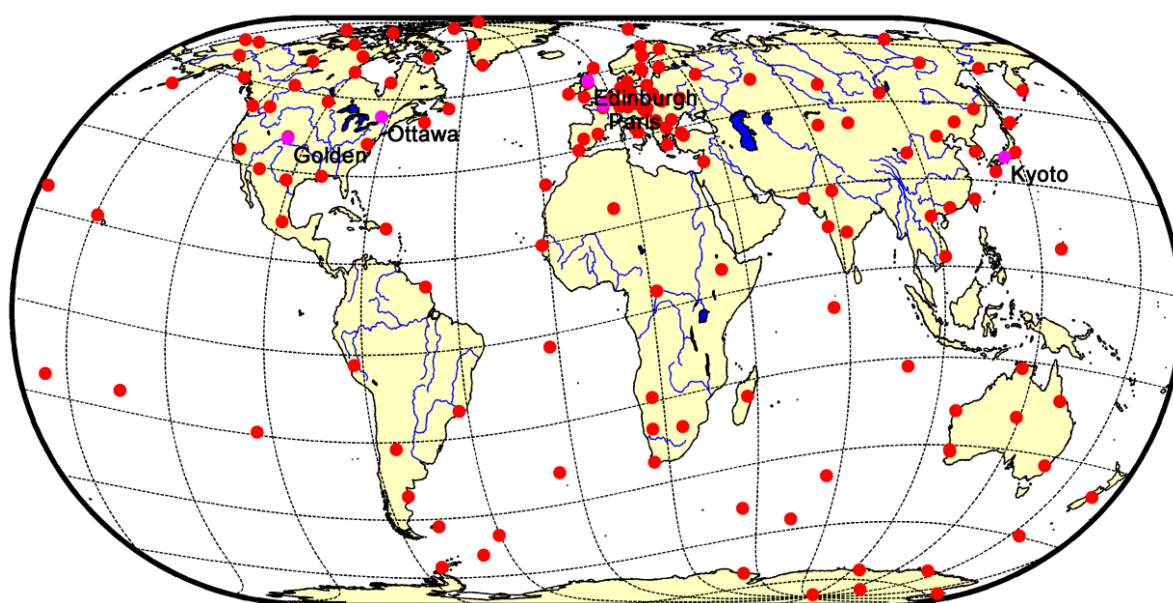


Рисунок 6.1 – 144 обсерватории и 5 GIN (2014)

Наблюдение за главным магнитным полем Земли и его изучение является одной из важнейших задач геофизики. Система ИНТЕРМАГНЕТ служит основой мониторинга состояния магнитного поля Земли, поэтому требования к достоверности предоставляемой ею информации очень высоки. Несмотря на жесткий высокий стандарт качества регистрирующих приборов, они подвержены внешним воздействиям, которые отражаются на качестве записей. Поэтому важной задачей является объективное, формализованное распознавание, а затем и устранение возникающих аномалий (сбоев) на записи. На рис. 6.2 приведены примеры характерных временных аномалий, которые требуется устранить для дальнейшего использования полученных наблюдений в целях мониторинга магнитного поля Земли и других фундаментальных исследований. Подобные аномалии (сбои), как правило, вызваны следующими причинами:

- природные явления;
- техногенные явления, включая перемещения больших объемов металла;
- калибровка измерительного прибора;
- искажение данных при их передаче из обсерваторий в информационные узлы посредством сети Интернет.

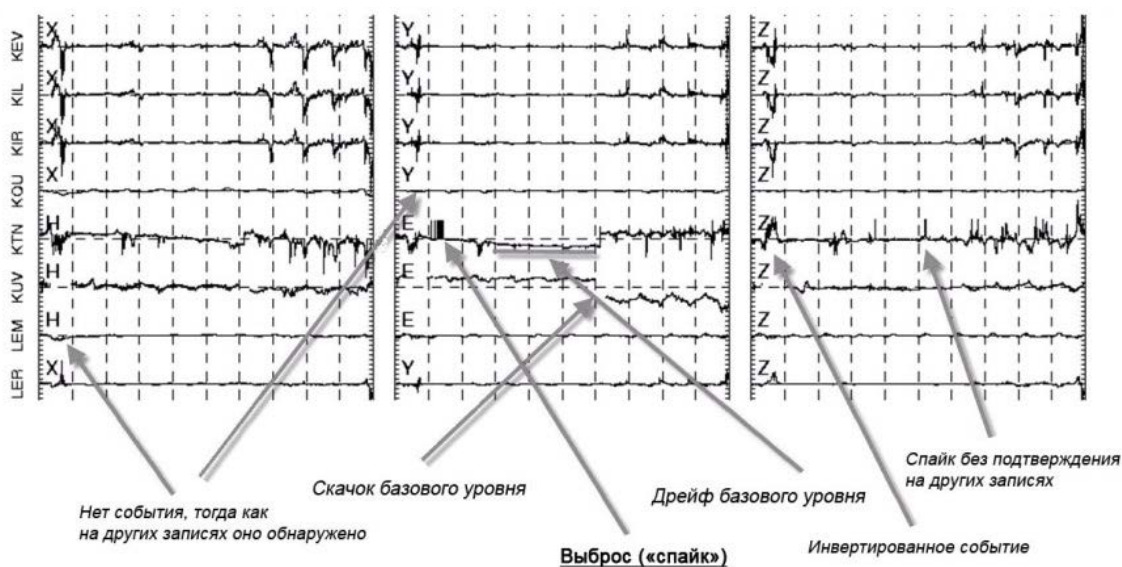


Рисунок 6.2 – Примеры аппаратных сбоев магнитометра, отраженных на записях

К природным явлениям, прежде всего, относятся грозы, которые индуцируют электрические токи внутри Земли и вызывают кратковременные изменения естественного хода ее магнитного поля. Полярное сияние при максимальной амплитуде магнитной бури может также оказывать кратковременное воздействие на обсерватории, расположенные в полярных областях, за счет возникновения токов в атмосфере. Примером подобных природных явлений являются и пульсации магнитного поля, вызванные солнечной активностью.

К техногенным явлениям можно отнести близость городов, аэродромов, железных дорог, линий электропередачи. Это также приводит к индуцированию токов внутри Земли

и созданию помех в работе магнитного оборудования. При регулярной калибровке прибора искусственно создаются помехи для проверки его работоспособности, что также сказывается на регистрируемых записях.

При передаче данных через Интернет нестабильный канал связи (например, спутниковый) может быть причиной появления сбоев на записях. Такие сбои обнаруживаются экспертом при сравнении интернет-данных с данными за тот же период регистрации, хранимыми независимо в локальных архивах. В то же время на выделенных каналах подобные сбои не наблюдаются.

Важный шаг в направлении такой математической формализации распознавания аномалий был предпринят в [2], где приведен созданный алгоритм $SP(\Delta, \lambda, \alpha, \beta)$. Он был применен к распознаванию временных возмущений на магнитограммах, записанных на приборах с минутной регистрацией. При этом были обработаны записи, которые были получены семью обсерваториями ИНТЕРМАГНЕТ, расположенными в разных частях земного шара.

Сейчас большинство обсерваторий функционирует в режиме минутной регистрации. Одной из важнейших задач ИНТЕРМАГНЕТ является переход всех обсерваторий сети на режим секундной регистрации геомагнитных данных. Такой переход даст возможность изучения магнитных пульсаций типа Pc2, Pc3 и Pc4 [3], в частности и с помощью описанного алгоритма.

Необходимо отметить, что в случае секундных магнитограмм формализация распознавания временных возмущений становится еще более актуальной задачей. Действительно, на таких высокочастотных записях малые возмущения, как правило, визуально неотличимы. Наряду с повседневной деятельностью, работа с такими данными требует от экспертов повышенного внимания при более детальном изучении предварительных записей. В то же время, при переходе от минутной регистрации к секундной, количество возмущений на магнитограммах становится несравнимо больше. В огромной мере возрастает вероятность ошибок и субъективного подхода экспертов. Эти обстоятельства делают преобразование предварительных данных в окончательные крайне затруднительным, а иногда и невозможным. Последнее является ярким подтверждением необходимости разработки и использования оригинальных формализованных алгоритмов распознавания возмущений на магнитных временных рядах.

В работе описан алгоритм $Sps(\mu, \rho_1, \rho_2)$, решающий задачу выделения спайков на секундных записях.

Несмотря на то, что алгоритмы SP и SPs решают подобные задачи, они сильно отличаются друг от друга. Другим существенным недостатком этих алгоритмов является множество параметров, не всегда понятных с физической точки зрения.

6.2. Секундные данные

Чтобы показать работу нового алгоритма выделения аномалий, были использованы секундные данные сети ИНТЕРМАГНЕТ (рис. 6.3, 6.4).

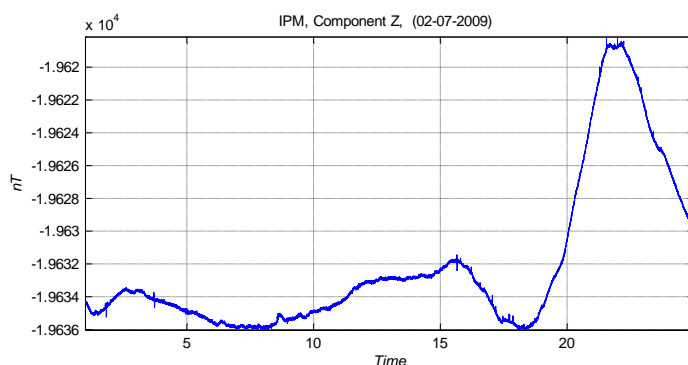


Рисунок 6.3 – Исходная магнитограмма

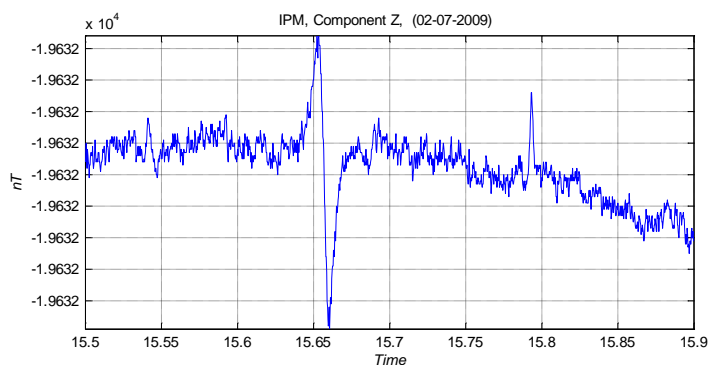


Рисунок 6.4 – Фрагмент магнитограммы

Далее для двух существенно различных λ были построены гравитационные сглаживания. Сглаживание при большем $\lambda = 0,9999$ будет аналогом некоторого идеального течения процесса, отображенного на магнитограмме (рис. 6.5). Сглаживание при меньшем $\lambda = 0,4$ лучше сканирует исходную запись, игнорируя маленькие, несущественные колебания, и сохраняя большие, существенные всплески (рис. 6.6).

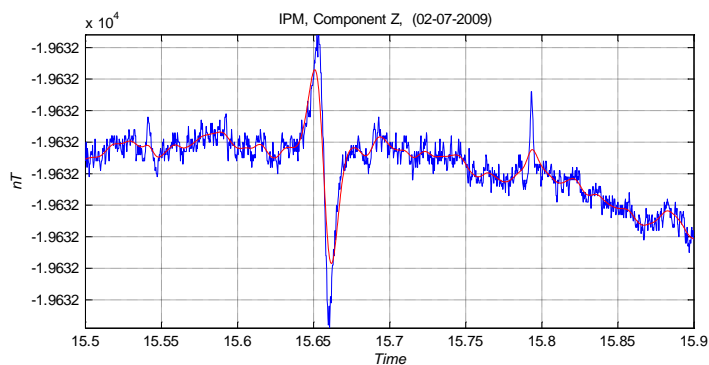


Рисунок 6.5 – Сглаживание магнитограммы с $\lambda=0,9999$

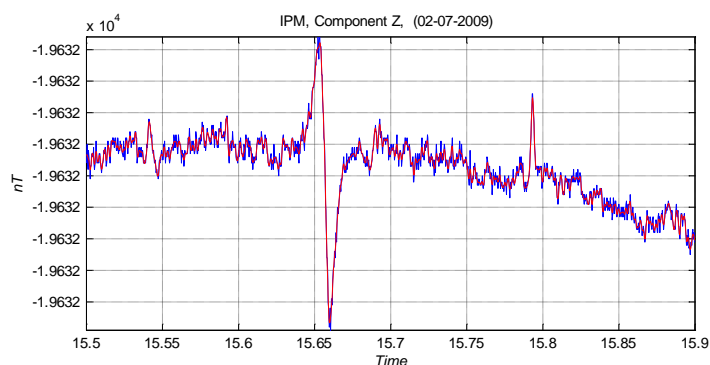


Рисунок 6.6 – Сглаживание магнитограммы с $\lambda=0,4$

Модуль разности этих двух сглаживаний будет аналогом выпрямления в алгоритме FCARS [4, 5]. Далее, используя нечеткие сравнения алгоритма FCARS, строится уровень максимальности, обозначенный на рис. 6.7 и 6.8 зеленой линией.

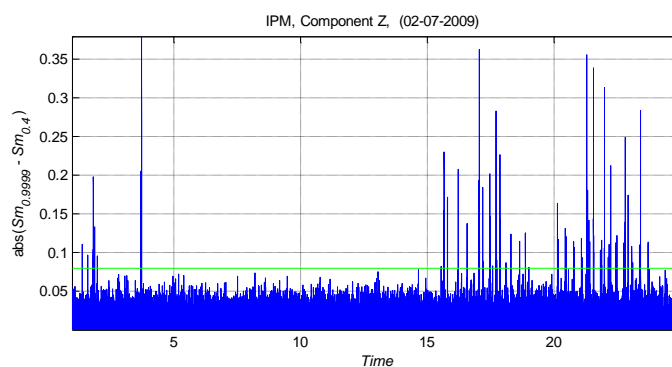


Рисунок 6.7 – Выпрямление с рассчитанным уровнем максимальности

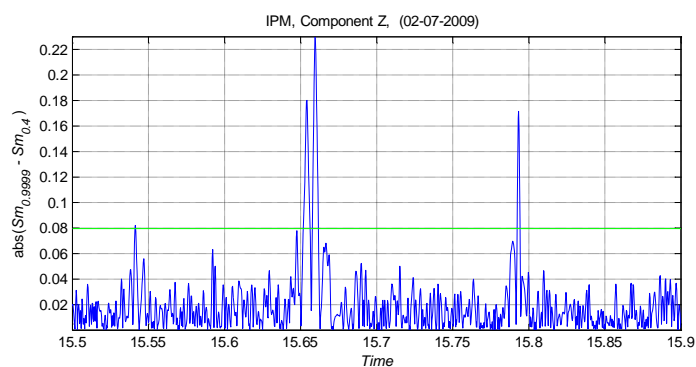


Рисунок 6.8 – Фрагмент выпрямления

Все точки выпрямления, выходящие за пределы, считаются аномальными. Последующий анализ этих точек на разнице сглаживаний и их объединение с соседними близкими точками позволяет выделить аномалию целиком (рис. 6.9).

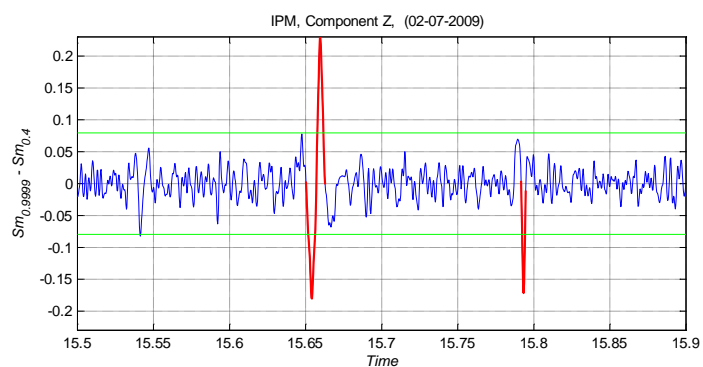


Рисунок 6.9 – Объединение аномальных точек

Результаты работы алгоритма показаны на рис. 6.10 и 6.11.

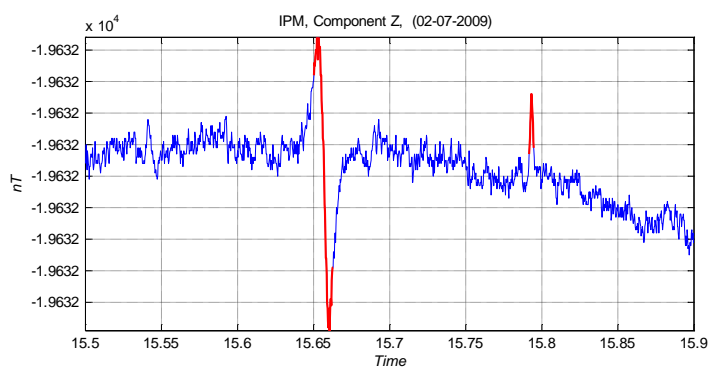


Рисунок 6.10 – Исходная магнитограмма с выделенными аномальными фрагментами

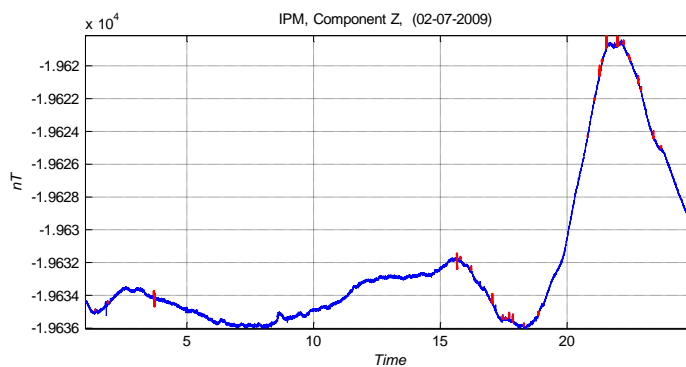


Рисунок 6.11 – Исходная магнитограмма с выделенными аномальными фрагментами

Список публикаций по результатам проекта

Статьи в журналах

- 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. Импакт-фактор: Scopus 0,235.
- Соловьев А. А., Гвишиани А. Д., Горшков А. И., Добровольский М. Н., Новикова О. В.** Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и пути развития // Физика Земли. 2014. № 2. С. 3–20. Импакт-факторы: РИНЦ 0,326; WoS 0,494; Scopus 0,376.
- Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R., Dobrovolsky M. N., Kagan A. I.** Weighted gravitational time series smoothing // Russ. J. Earth Sci. 2014. Vol. 14, ES3002. doi:10.2205/2014ES000543. Импакт-фактор: РИНЦ 0,696.

Отчет по результатам проекта

По результатам выполнения НИР в 2012-2014 г. подготовлен, сдан и размещен на сайте ФГАНУ ЦИТиС отчет. Регистрационный номер ИКРБС № 215020970017.

Список использованных источников

1. **Соловьев А. А.** и др. Распознавание возмущений с заданной морфологией на временных рядах. II. Выбросы на секундных магнитограммах. Физика Земли. 2012. № 5. С. 37–52.
2. **Богоутдинов Ш. Р.** и др. Распознавание возмущений с заданной морфологией на временных рядах. I. Выбросы на магнитограммах всемирной сети ИНТЕРМАГНЕТ. Физика Земли. 2010. 2011. С. 99–112.
3. Клейменова Н. Г. и др. Геомагнитные пульсации Модели космоса. М.:МГУ. 2007. ред. Панасюк М. И. Т. 1. С. 511–627.
4. **Гвишиани А. Д.** и др. Определение аномалий на временных рядах методами нечеткого распознавания. Доклады Академии наук. 2008, Т. 421, 1, С. 101–105.
5. **Гвишиани А. Д.** и др. Математические методы геоинформатики. III. Нечеткие сравнения и распознавание аномалий на временных рядах. Кибернетика и системный анализ. 2008, Т. 44, 3, С. 3–18.

7. Интеллектуальная медицинская геоинформационная система для территории России в условиях изменяющегося климата

Номер гос. регистрации № 0145-2014-0006

Руководитель: директор ГЦ, академик А. Д. Гвишиани

Соруководитель: в.н.с., к.ф.-м.н. Ю. С. Любовцева

В результате выполнения госзадания по данному проекту в 2014 году впервые для всей территории России создана современная интеллектуальная многодисциплинарная геоинформационная система (ИМГИС), объединяющая данные по демографии, здоровью населения, экологии и климату. На основе инновационных методов, использующих демографические эволюционные модели, проведен анализ и оценка влияния окружающей среды и климата на здоровье населения регионов РФ.

Программа фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине» предусматривает создание систем количественных критериев, которые одновременно отражали бы климатические изменения, изменения показателей природных факторов и показателей уровня жизни и здоровья населения.

Использование географических информационных систем (ГИС) является самым современным методом сбора, хранения, обработки и визуализации пространственных данных, а также получения на их основе новой информации и знаний о пространственно-координированных связях в сложных многодисциплинарных системах. Технология ГИС объединяет традиционные операции работы с базами данных с преимуществами полноценного визуального представления и пространственного анализа.

В настоящее время существуют примеры успешного построения МГИС отдельных регионов. Между тем, практически не предпринимались попытки построения МГИС для всей территории России, включающей в себя одновременно климатические, экологические, природные и медико-географические данные. Поэтому целью проекта явилось создание современной аналитической многодисциплинарной интеллектуальной МГИС России, охватывающей всю территорию страны в условиях изменяющегося климата и экологии, а также получение на этой основе информации об их связи и корреляции.

Система ИМГИС составлена на основе накопленной информации институтами РАН, РАМН, Росгидромета, Минздравсоцразвития, Федеральной службы государственной статистики о динамике изменений климата, изменений состояния экосистем в пространстве и во времени, рисков заболеваемости и смертности населения.

Впервые использованы инновационные методы, основанные на демографических эволюционных моделях для анализа геомедицинских данных и прогноза рисков нарушения здоровья населения всех регионов РФ.

Создана современная аналитическая интеллектуальная многодисциплинарная ГИС для анализа влияния окружающей среды на здоровье населения России.

Разработана методика, на основе которой построены карты и проведено районирование территории РФ по состоянию здоровья и по медико-экологическим показателям для всех регионов России.

Принципиальной особенностью созданной ИМГИС является наличие в ее составе приложения для взаимодействия удаленных пользователей с унифицированными цифровыми слоями. Все слои сопровождаются подробным описанием в соответствующих файлах метаданных. Доступ к описанию ИМГИС, метаданным, а также опубликованным веб-серверам осуществляется посредством единого веб-ресурса www.gis.gcras.ru.

Система ИМГИС позволяет выявлять тенденции изменения состояния здоровья населения в различных регионах России, связанные с климатическими изменениями, и получать полную информацию о географическом распределении медико-демографических индикаторов на текущий момент.

Инновационные методы районирования территории России по уровню здоровья и прогнозирование медико-экологической обстановки на различных территориальных уровнях позволяет обосновывать и разрабатывать меры по адаптации населения к меняющимся климатоэкологическим условиям. Созданная ИМГИС приспособлена для контроля результатов деятельности региональных организаций при планировании ими санитарно-профилактических мероприятий по социально-экологической защите населения.

Впервые создана современная интеллектуальная многодисциплинарная геоинформационная система – ИМГИС, объединяющая данные по демографии, здоровью населения, экологии и климату на территории России. Актуальность проблемы обусловлена растущей смертностью населения России, связанной со старением населения и низкой скоростью его воспроизводства.

Основные результаты, полученные в ходе работ над проектом:

1. Проанализированы медико-экологическая и медико-демографическая ситуации в целом по стране и по отдельным ее регионам и выделены основные факторы, ведущие к депопуляции и сокращению продолжительности жизни населения.
2. Проведено медико-экологическое районирование территории России, позволяющее оценить риски заболеваемости и смертности, связанные с загрязнениями атмосферы, воды и почвы.
3. Продемонстрировано влияние климатических изменений на здоровье и смертность населения на территории РФ.
4. Осуществлена визуализация пространственных данных о здоровье, демографии, заболеваемости и изменении климата в виде цифровых карт по территории РФ.
5. Исследовано влияние климатических факторов на смертность населения в различных возрастных группах. Показано, что даже короткопериодные температурные изменения (волны жары) ведут к существенному увеличению смертности в старшей возрастной группе (старше трудоспособного возраста).

6. Показано, что в старшей возрастной группе основной причиной смертности являются сердечно-сосудистые и онкологические заболевания. В других возрастных группах основные риски связаны с внешними причинами.
7. Сформулирована новая трехкомпонентная математическая модель развития эпидемических заболеваний.
8. Представлены прогнозы численности населения и общей картины заболеваемости социально значимыми болезнями до 2040 года для регионов РФ.
9. Конечный результат моделирования представлен в виде компьютеризированного набора карт, позволяющих оценивать текущее состояние здоровья населения на федеральном и региональном уровнях, предсказывать тренды возможных изменений состояния здоровья населения и устанавливать связи фактора здоровья с экологическими и климатическими характеристиками, а также социально-экономическим состоянием всех территориальных единиц РФ.

На рисунках представлены результаты анализа смертности населения в 2009 и 2010 году в трех возрастных группах (рис. 7.1–7.3) и результаты заболеваемости в 2011 г. (рис. 7.4) и прогноза заболеваемости болезнями системы кровообращения в 2040 г. (рис. 7.5).

На рис. 7.6 показано районирование территории России по уровню здоровья населения в 2011 году. Здесь: 1 означает высокий уровень здоровья населения, 9 – крайне низкий уровень здоровья населения.

На рис. 7.7 представлена карта медико-экологического районирования территории России, построенная с учетом загрязнения воды и почвы различных регионов. Выделены территории повышенного риска (кластеры 7–9).

Проведен анализ медико-демографического состояния территориальных единиц РФ. Продемонстрирована существенная неравномерность уровня заболеваемости различными группами болезней и смертности взрослого и детского населения по территории РФ, и, как следствие, различной демографической нагрузки. Представлено медико-экологическое районирование регионов РФ и выделены зоны максимальных рисков для здоровья населения.

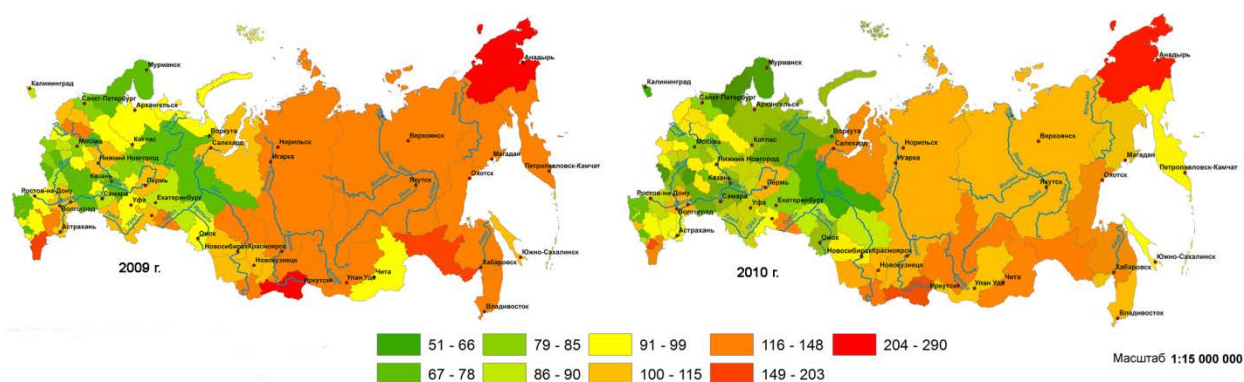


Рисунок 7.1 – Смертность населения в возрасте 0-17 лет от всех причин смерти на 100 000 человек соответствующего возраста

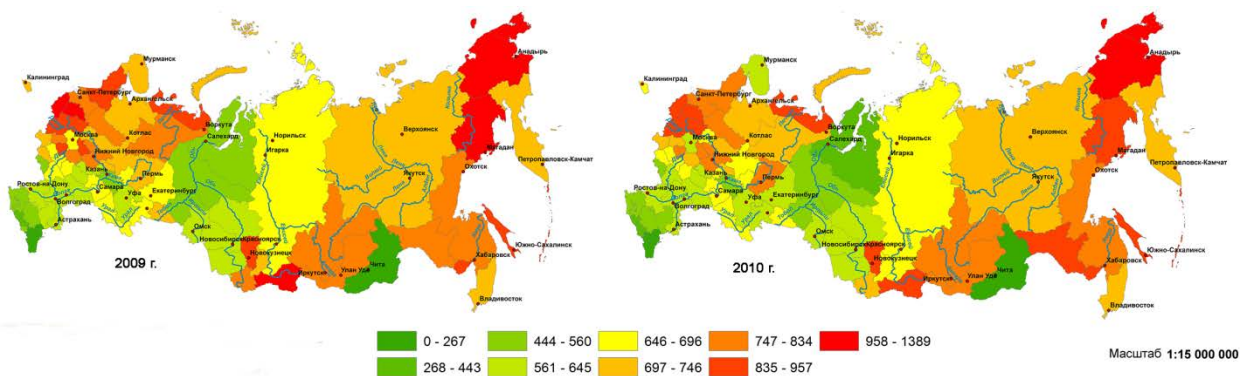


Рисунок 7.2 – Смертность населения трудоспособного возраста от всех причин смерти на 100 000 человек соответствующего возраста

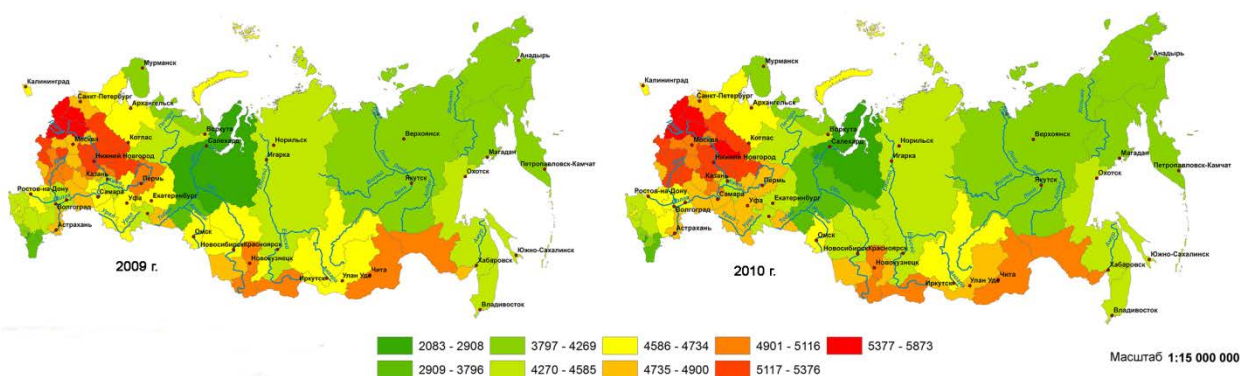


Рисунок 7.3 – Смертность населения старше трудоспособного возраста от всех причин смерти на 100 000 человек соответствующего возраста



Рисунок 7.4 – Болезни системы кровообращения взрослого населения на 100 000 человек, 2011 г.



Болезни системы кровообращения взрослого населения на 100 000 человек 2040 г.



Рисунок 7.5 – Прогноз заболеваемости болезнями системы кровообращения взрослого населения на 100 000 человек, 2040 г.



Рисунок 7.6 – Районирование территории России по уровню здоровью населения, 2011 г.



Рисунок 7.7 – Районирование территории России по медико-экологическому состоянию, 2011 г.

Список публикаций по результатам проекта

Статьи в журналах

- Голубков Г. В., Манжелий М. И., **Лушников А. А.** Радиохимическая физика верхней атмосферы земли // Химическая физика. 2014. Т. 33. № 7. С. 101–108. (**Lushnikov A. A.**, Golubkov G. V., Manzhelii M. I. Radiochemical physics of the upper Earth's atmosphere // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2014. Vol. 8, Issue 4. P. 604–611. doi:10.1134/S1990793114040034). Импакт-факторы: РИНЦ 0,430; WoS 0,336; Scopus 0,283.
- Лушников А. А.**, Загайнов В. А., **Любовцева Ю. С.**, **Гвишиани А. Д.** Образование наноаэрозолей в тропосфере под действием космического излучения. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 2. С. 175–184. (**Lushnikov A. A.**, Zagaynov V. A., **Lyubovtseva Yu. S.**, **Gvishiani A. D.** Nanoaerosol Formation in the Troposphere under Action of Cosmic Radiation // Atmospheric and Oceanic Physics. 2014. Vol. 50. No. 2. P. 152–159.). Импакт-факторы: РИНЦ 0,589; WoS 0,597; Scopus 0,580.
- Любовцева Ю. С.**, **Каган А. И.**, **Пятьгина О. О.**, Воронова Е. В. Медико-экологическое районирование территории России // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 4. С. 41–59. Импакт-факторы: РИНЦ 0,614; WoS 0,597; Scopus 0,580.
- Lushnikov A. A.** Composition distributions of particles in a gelling mixture // Physical Review E 89, 032121. 2014. doi:10.1103/PhysRevE.89.032121. Импакт-факторы: WoS 2,326; Scopus 0,970.
- Lushnikov A. A.**, **Kagan A. I.**, **Lyubovtseva Yu. S.**, **Gvishiani A. D.** Modeling the Evolutionary Demographic Processes for Geomedicine // Izvestia, Atmospheric and Oceanic Physics. 2014. Vol. 50, Issue 7. P. 661–668. doi: 10.1134/S0001433814040021. Импакт-факторы: РИНЦ 0,517; WoS 0,597; Scopus 0,580.

Статьи в монографии

- Лушников А. А., Каган А. И.** Математическое моделирование геомедицинских процессов // Здоровье населения России: влияние окружающей среды в условиях изменяющегося климата / Под общ. ред. академика А. И. Григорьева; Российская академия наук. М.: Наука, 2014. 428 с. С. 194–217.
- Любовцева Ю. С., Гвишиани А. Д., Макоско А. А., Пятыгина О. О., Воронова Е. В.** Интеллектуальная медицинская геоинформационная система России в условиях изменяющегося климата // Здоровье населения России: влияние окружающей среды в условиях изменяющегося климата / Под общ. ред. академика А. И. Григорьева; Российская академия наук. М.: Наука, 2014. 428 с. С. 325–343.
- Любовцева Ю. С., Каган А. И., Пятыгина О. О., Воронова Е. В.** Оценка медико-демографической и медико-экологической ситуации на территории России // Здоровье населения России: влияние окружающей среды в условиях изменяющегося климата / Под общ. ред. академика А. И. Григорьева; Российская академия наук. М.: Наука, 2014. 428 с. С. 168–193.

Отчет по результатам проекта

Материалы исследований размещены в итоговом отчете по программе Президиума РАН 5П «Фундаментальные науки – медицине». Книга 2, раздел III «Окружающая среда и здоровье населения в условиях изменяющегося климата», подраздел 3.3 «Научные основы мониторинга и создания технологий снижения негативного влияния факторов окружающей среды на здоровье человека», проект 132 «Интеллектуальная аналитическая многодисциплинарная медицинская геоинформационная система для территории России», стр. 521–528. А также в монографии Президиума РАН по Программе № 5 «Здоровье населения России: Влияние окружающей среды в условиях изменяющегося климата».

Список использованных источников

1. Бокерия Л. А. (ред.) Здоровье России. Атлас, М. НССХ им. А. Н. Бакулева РАМН. 2011, 374 с.
2. Бокерия Л. А. (ред.) Здоровье России. Атлас, М. НССХ им. А. Н. Бакулева РАМН. 2010, 266 с.
3. Демографический ежегодник России, 2010, сс. 295–300.
4. Гофман В. В. // ГИС в здравоохранении и медицине в РФ, ARCREVIEW 2012, 1, [60] сс. 1–3.
5. Заболеваемость населения. Здравоохранение в Российской Федерации. Статистический сборник, Госкомстат России, М. 1996
6. Коэффициенты смертности по основным классам причин смерти по субъектам Российской Федерации (2010) // Демографический ежегодник России 2010, сс. 295–300. 252–253.
7. **Любовцева Ю. С., Красноперов Р. И., Гвишиани А. Д., Макоско А. А., Воронова Е. В., Лушников А. А.** // Информационное наполнение медицинской геоинформационной системы России, Тезисы доклада на международной конференции «Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле», 2012. (ИКИ РАН, Москва, Россия 2–8 июня 2012 года)
8. Население России за 100 лет (1897–1997) // Статистический сборник. М. Госкомстат России. 1998. 222 с.

9. Последствия изменения климата. // Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т.2 Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (РОСГИДРОМЕТ) М. 2008, 287 с.
10. Обзор загрязнений природной среды за 2005 год. // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета М. 2006.
11. Об особенностях изменения климата на территории РФ в 2009 году // доклад Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета М. 2009.
12. Об особенностях климата на территории РФ за 2011 год // доклад Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета М. 2012.
13. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2010 году // Государственный доклад Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета М. 2011.
14. Ревич Б. А. // Экологические приоритеты и здоровье: социально-уязвимые территории и группы населения. Экология человека. 2010 № 7.
15. Российский статистический ежегодник 2011, сс. 99–105.
16. Стандартизованные коэффициенты смертности по основным классам причин смерти // Демографический ежегодник России, Статистический сборник, М. 1997.
17. Струков Д. П. // ГИС здравоохранения Санкт-Петербурга: задачи, геопорталы, опыт. ARCREVIEW 2012 1 [60] с. 7–10.
18. Численность населения Российской Федерации по полу и возрасту на 1 января 2009 года// Статистический Бюллетень, М. Росстат, 2009. сс. 26–29.
19. Численность и миграция населения Российской Федерации в 2008 г.: Статистический бюллетень. М. Росстат. 2009. С. 29.

8. Аналитическая геоинформационная система для комплексной оценки ресурсов стратегического минерального сырья (ГИС «Ресурсы»)

Номер гос. регистрации № 0145-2014-0008

Руководитель: директор ГЦ, академик А. Д. Гвишиани

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

8.1. Цели и задачи исследования

Направление 1.1 «Геологическая и минералого-технологическая оценка ресурсов стратегического минерального сырья» программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 27 (ППРАН № 27) является важнейшим элементом государственной стратегии геологического изучения недр и воспроизводства минерально-сырьевой базы. Научно-аналитическое и информационное обеспечение мероприятий программы является одним из необходимых ее элементов, направленным на разработку аналитической геоинформационной системы (ГИС), предназначенной для сбора, хранения, анализа и предоставления данных, собранных в ходе реализации программы.

В 2014 г. в рамках проекта в ГЦ РАН продолжалась разработка инструмента, позволяющего собирать, анализировать и редактировать цифровую геопространственную информацию о минерально-сырьевых ресурсах, а также использовать генетически связанную информацию о геолого-геофизических полях с целью получения новых фундаментальных научных обобщений, оценки масштабов распределения и прогнозирования минерально-сырьевых запасов.

Основной целью проекта являлась разработка 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. Решение подобных задач требует наличия специалиста-эксперта, способного анализировать массивы пространственных данных различной тематики. В связи с этим возникает задача создания современных информационных систем, обеспечивающих эксперту удобный и оперативный доступ к данным различной тематики и позволяющих оперировать массивами пространственных данных, и выполнять сложный многоуровневый интеллектуальный анализ. При этом повышение автоматизации процедур анализа данных позволяет эксперту сосредоточиться на принятии конкретных управленческих решений. Основу исследований и разработок представляют цифровые геопространственные данные о сырьевых геолого-минералогических ресурсах РФ, о геологическом строении и геофизических полях Земли.

В 2014 г. исследовательские работы в рамках проекта велись по следующим основным направлениям:

- Расширение базы геопространственных данных и метаданных за счет включения новых тематических данных по геологии и геофизике.

- Совершенствование и расширение инструментария и функциональных возможностей веб-интерфейса для взаимодействия с картографическими веб-сервисами, опубликованными в рамках проекта.
- Разработка и оптимизация алгоритмов кластерного анализа и их адаптация для работы с геопространственными данными.

8.2. Расширение базы геопространственных данных проекта

В результате исследований по проекту в 2014 г. были обработаны и помещены в ГИС новые слои геолого-геофизической информации. Первичная обработка включала в себя конвертацию данных в формат, совместимый с используемым программным обеспечением (ПО) ESRI ArcGIS, оформление соответствующих цифровых карт, подготовку метаданных, отражающих основные характеристики включаемого тематического слоя данных. Подготовленные с помощью серверного ПО тематические слои данных были опубликованы в виде единого картографического веб-сервиса, обеспечивающего оперативный доступ к геопространственным данным [1–5]. Также было выполнено обновление тематических слоев данных, включенных в ГИС на этапе 2012–2013 гг. Основное направление обновления уже имеющихся в базе слоев заключалось в составлении более совершенной легенды. В качестве основы картографического сервиса в базе геоданных ГИС присутствуют собранные ранее в рамках выполнения проекта цифровые слои данных, обновленные в 2014 г.:

- Геологическая карта России масштаба 1:2 500 000 [6];
- Прогнозно-минерагеническая карта на твердые полезные ископаемые территории России, увязанная с материалами по странам СНГ масштаба 1:2 500 000 [7];
- Минерагеническая карта Российской Федерации и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР) масштаба 1:2 500 000 [8].

В 2014 г. в картографический веб-сервис проекта включены тематические слои данных, построенные на основе опубликованных ранее результатов геофизических исследований. Включены тематические слои, построенные на основе модели гравитационного поля EIGEN-6с2. Модель получена путем совместной обработки данных наземных наблюдений и спутниковых данных, включая данные спутников LAGEOS, GRACE и GOCE со времени их запуска по 2012 г. Максимальное разрешение 1949 гармоник для модели EIGEN-6с2 [9]. На основе модели EIGEN-6с2 были рассчитаны аномалии геоида для всего земного шара. Эти данные были включены в веб-сервис в виде отдельного тематического слоя. Данные по аномальному гравитационному полю, создаваемому осадочным чехлом, также включены в базу данных ГИС.

8.3. Интерактивный доступ к результатам проекта

В 2014 г. значительно усовершенствован инструментарий для предоставления доступа к данным, собранным в рамках проекта. Основной компонент интерактивного

получения и анализа геопространственных данных о ресурсах стратегического материального сырья России представлен одним из сервисов единого геопортала ГИС «Данные наук о Земле по территории России» (<http://gis.gcras.ru>).

Обновленный интерфейс геопортала позволяет вызывать из базы данных и просматривать цифровые слои геолого-геофизической информации, просматривать метаданные, а также выполнять простейшие операции (рис. 8.1).

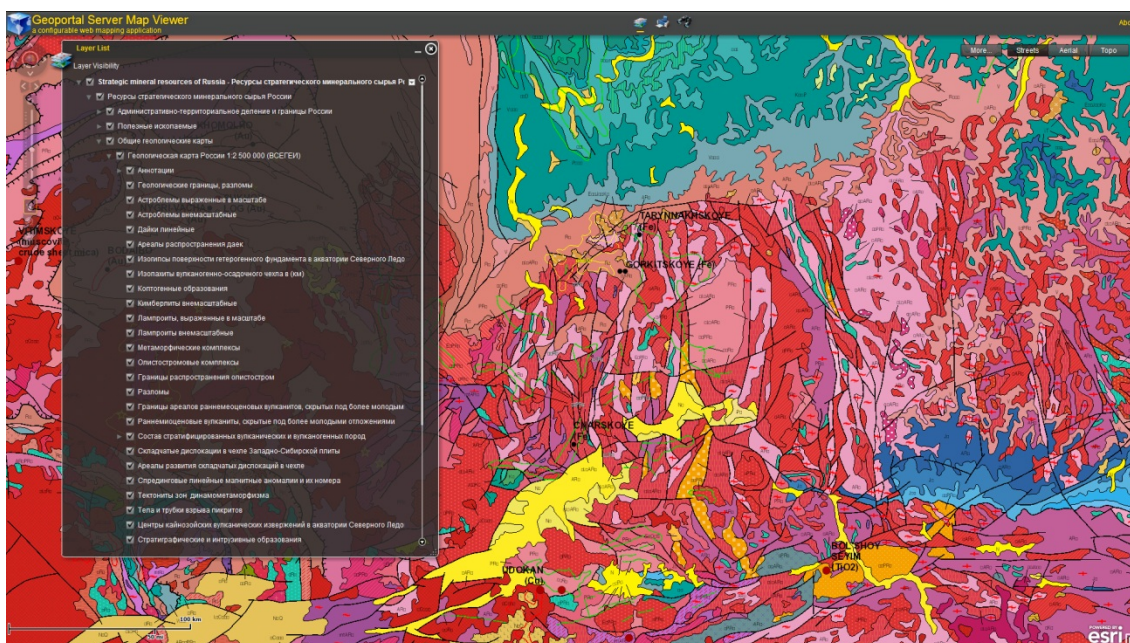


Рисунок 8.1 – Интерфейс для просмотра и редактирования картографической информации в режиме онлайн

Интерфейс обеспечивает сравнительный пространственный анализ разных тематических слоев с целью обеспечения новой информацией исследователей в области пространственного распределения минерально-сырьевых ресурсов, выявления пространственных закономерностей и взаимосвязей с различными геолого-геофизическими полями. Эти возможности делают данный веб-сервис эффективным аналитическим инструментом в области освоения, оценки перспектив и прогнозирования запасов минерально-сырьевых ресурсов России.

8.4. Разработка и оптимизация алгоритмов кластерного анализа и их адаптация для работы с геопространственными данными

Аналитическая компонента геопортала предусматривает использование современных алгоритмов искусственного интеллекта (в области распознавания образов). В настоящее время проводится опробование уже созданных и разработка новых алгоритмов с целью их применения в предлагаемом геологическому научному сообществу интерактивном геоинформационном средстве.

В Геофизическом центре РАН разработан и реализован алгоритм Discrete Perfect Sets (DPS), который при соответствующем выборе параметров выделяет области повышенной

плотности в многомерном массиве на основе формальной конструкции плотности [10–13]. Построены новые модификации алгоритма, позволяющие выделять аномалии на временных рядах и двумерных рельефах.

Позднее алгоритм DPS был усовершенствован за счет использования его в совокупности с разработанным алгоритмом плоского расширения кластеров E^2XT [14]. Эффективность нового подхода была продемонстрирована в процессе анализа данных сейсмической активности двух регионов мира. Наиболее показательным является результат анализа сейсмичности Кавказа. Результаты распознавания зон возможного возникновения эпицентров землетрясений с $M \geq 5,0$ представлены на рис. 8.2.

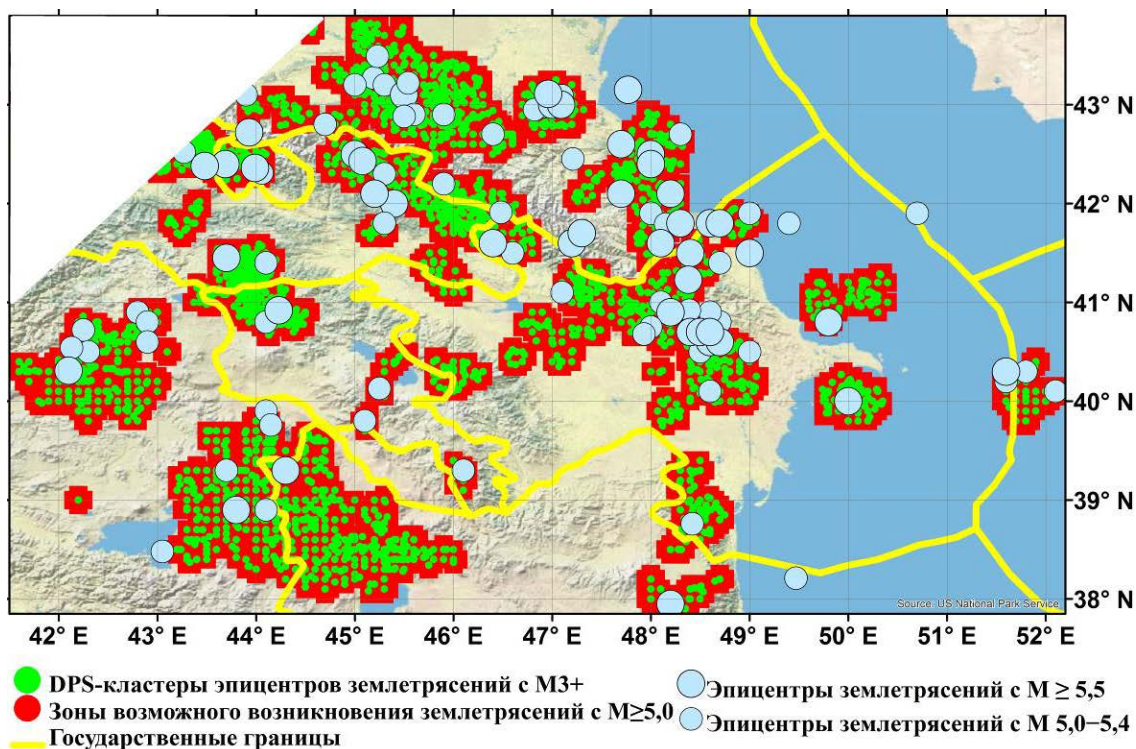


Рисунок 8.2 – Зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5,0$ на Кавказе и эпицентры землетрясений с $M \geq 5,0$.

Из 105 рассматриваемых сильных землетрясений эпицентры только восьми землетрясений не попали в распознанные зоны, что свидетельствует о высокой эффективности метода. Алгоритм DPS включен в банк данных алгоритмов ГИС и проводится работа по его внедрению в веб-портал для использования с различными слоями геолого-геофизической информации.

В рамках взаимодействия институтов-участников программы алгоритмы дискретного математического анализа применены для оценки перспектив нефтегазоносности не вскрытой части разреза фундамента в центральной части Западной Сибири на границе осадочные породы/фундамент. Получены оценки значимости и иерархии важнейших критериев оценки перспективности глубоких месторождений [15].

8.5. Участие в научных мероприятиях

В 2014 г. участниками Программы была организована Международная конференция «Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле» (Modern Information Technologies in Earth Sciences – ITES-2014), прошедшая в Петропавловске-Камчатском 8–13 сентября (<http://kamchatka2014.fegi.ru>). Организаторами конференции являлись: Отделение наук о Земле РАН, Дальневосточное отделение РАН, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН им. Н. А. Шило и Геофизический центр РАН.

Конференция объединила ведущих российских и зарубежных специалистов в области информационных и телекоммуникационных технологий, прикладной математики и математического моделирования, системного анализа, геоинформатики, геофизики, дистанционного зондирования, баз данных и других смежных дисциплин. Конференция явилась важным событием в ходе работ по Программе. Участники Программы в своих устных и стендовых докладах представили ключевые результаты работы по своим проектам, а также подвели предварительные итоги работы. Некоторые доклады были включены в пленарную сессию конференции. Представители организаций-участников Программы выступили в качестве модераторов тематических сессий. В ходе заседаний обсуждался широкий круг вопросов:

- Геоинформационное обеспечение фундаментальных исследований в области наук о Земле. Инфраструктура пространственных данных. Проблемы интеграции пространственных данных, сервисов и приложений. Интеллектуальные ГИС.
- Дистанционное зондирование. Спутниковый мониторинг окружающей среды. Методы анализа спутниковых данных. Сервисы оперативного доступа к спутниковым данным и системам их обработки.
- Организация сетей сбора информации. Разработка систем удаленного мониторинга природных объектов.
- Унифицированные коммуникации. Облачные технологии. Корпоративные порталы. Опыт построения и проблемы.
- Математическое моделирование природных процессов. Математические методы анализа информации.
- Открытый доступ как современная практика научной коммуникации. Электронные библиотеки и коллекции. Интеграция территориально распределенных разнородных научных данных в области наук о Земле.
- Виртуальные научные среды и лаборатории.

В докладах, представленных участниками Программы, обсуждались современные проблемы и перспективы математической геологии и геофизики. Затрагивалась проблема управления данными (data management) и извлечения знаний и интеллектуального анализа данных (data mining). Эта проблема в настоящее время стоит наиболее остро, поскольку

имеет место быстрый постоянный рост объемов геолого-геофизических данных. Кроме того, ведутся непрерывные работы по переводу накопленных архивов геофизических данных из аналогового формата в цифровой. Это приводит к необходимости создания научно-обоснованного эффективного управления базами данных геофизических наблюдений во всей их совокупности. В связи с этим возникает проблема организации эффективного доступа к имеющимся базам геопространственных данных по геологии и геофизике. На конференции подробно обсуждалась актуальная проблема развития инфраструктуры пространственных данных (ИПД) в области данных наук о Земле. В ходе выступлений отмечалось, что проблема ИПД сохраняется также на терминологическом и понятийном уровнях [16]. Было отдельно подчеркнuto, что на сегодняшний день при создании элементов ИПД наиболее прогрессивным является использование стандартов, разработанных Open Geospatial Consortium (OGC).

Ряд докладов был посвящен онлайн-сервисам, предоставляющим доступ к базам геоданных по наукам о Земле. Среди прочих были отмечены сервис OneGeology, геопортал ВСЕГЕИ, геопортал «Техногенные минеральные образования России» ГГМ им. В. И. Вернадского РАН, геопортал ИВиС ДВО РАН и другие известные онлайн-сервисы. В отдельном докладе были представлены результаты работы, полученные в рамках настоящего проекта программы [5].

Отдельная сессия конференции была посвящена математическим методам анализа данных и моделированию природных процессов.

Список публикаций по результатам проекта

Статьи в журналах

- Kaban M. K.**, Tesauro M., Mooney W. D., Cloetingh S. A. P. L. Density, temperature, and composition of the North American lithosphere – New insights from a joint analysis of seismic, gravity, and mineral physics data: 1. Density structure of the crust and upper mantle // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2014. Vol. 15. doi:10.1002/2014GC005483.
- Kaban M. K.**, Yuanda T. R. Density Structure, Isostatic Balance and Tectonic Models of the Central Tien Shan. // *Surveys in Geophysics.* 2014. Vol. 35, No. 6. pp. 1375–1391. doi: 10.1007/s10712-014-9298-7
- Tesauro M., **Kaban M. K.**, Mooney W. D., Cloetingh S. A. P. L. NACr14: A 3D model for the crustal structure of the North American Continent // *Tectonophysics.* 2014. Vol. 631, pp. 65–86. doi: 10.1016/j.tecto.2014.04.016 Импакт-факторы: WoS 2, 866; Scopus 1,817.
- Tesauro M., **Kaban M. K.**, Mooney W. D., Cloetingh S. A. P. L. Density, temperature, and composition of the North American lithosphere–New insights from a joint analysis of seismic, gravity, and mineral physics data: 2. Thermal and compositional model of the upper mantle // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2014. Vol. 15. doi: 10.1002/2014GC005484

Материалы конференций

Soloviev A. A., Gvishiani A. D., Pyatygina O. O., Rybkina A. I., Nikiforov O. V. Web mapping services for providing geological, geophysical and medical geography geodata // In «Modern information technologies in Earth sciences»: Proceedings of the International Conference, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, September 8–13, 2014. Vladivostok: Dalnauka. 2014. P. 90.

Список использованных источников

1. **Березко А. Е., Соловьев А. А., Гвишиани А. Д., Жалковский Е. А., Красноперов Р. И., Смагин С. А., Болотский Э. С.** Интеллектуальная географическая информационная система «Данные наук о Земле по территории России» // Инженерная экология. 2008. № 5. С. 32–40.
2. **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. No. 1. ES1001. doi: 10.2205/2011ES000501
3. **Красноперов Р. И., Лебедев А. Ю., Пятагина 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.
4. **Rybkina A., Krasnoperov R., Pyatygina O., Shibaeva A.** Geoinformation system with algorithmic shell as a new tool for Earth sciences / In Proceedings of 1st Czech-Russian Forum of Young Scientists (19–22 April 2012, Pilsen, Czech Republic). Pilsen: University of West Bohemia. 2012. P. 17–18.
5. **Soloviev A. A., Gvishiani A. D., Pyatygina O. O., Rybkina A. I., Nikiforov O. V.** Web mapping services for providing geological, geophysical and medical geography geodata // In «Modern information technologies in Earth sciences»: Proceedings of the International Conference, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, September 8–13, 2014. Vladivostok: Dalnauka. 2014. P. 90.
6. Андрианова О. Н., Гурьева И. Г., Кузнецова Г. Н., Липатов А. В., Сирота Ю. Н., Чистякова Т. Н. Государственная геологическая карта масштаба 1:2 500 000. СПб.: ФГУП «ВСЕГЕИ». 2011.
7. Петров О. В. (гл. ред.), Феоктистов В. П. (ред.) и др. Прогнозно-минерагеническая карта на твердые полезные ископаемые территории России, увязанная с материалами по странам СНГ масштаба 1:2 500 000. СПб.: ФГУП «ВСЕГЕИ». 2008.
8. Роднов Ю. Н., Белкина И. Л. (ред.) и др. Минерагеническая карта Российской Федерации и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР) масштаба 1:2 500 000. М.: ФГУНПП «Аэрогеология». 2009.
9. Förste C., Bruinsma S. L., Shako R., et al. A new release of EIGEN-6: The latest combined global gravity field model including LAGEOS, GRACE and GOCE data from the collaboration of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse // Geophysical Research Abstracts. 2012. Vol. 14. Abstract No. EGU2012-2821.
10. **Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Добровольский М. Н.** Об одном алгоритме поиска плотных областей и его геофизических приложениях / В сб. «Математические методы распознавания образов: 15-я Всероссийская конференция» (г. Петрозаводск, 11–17 сентября 2011). М.: 2012. С. 543–546.

11. **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.
12. **Добровольский М. Н., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Лебедев С. А.** Алгоритмы дискретного математического анализа (ДМА) для обработки геофизических данных и возможность их применения к обработке данных дистанционного зондирования / В сб. «Спутниковые методы и системы исследования Земли» (Материалы Третьей международной Школы-семинара, Таруса, 28 февраля – 5 марта 2012). М.: ИКИ. 2012.
13. **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. doi: 10.1007/s10559-014-9605-9
14. **Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Добровольский М. Н., Дзобоев Б. А.** Объективная классификация эпицентров и распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии // Геоинформатика. 2013. № 2. С. 44–57.
15. **Богоутдинов Ш. Р., Шустер В. Л., Агаян С. М., Цаган-Манджиев Т. Н., Кафган В. И.** Оценка перспектив нефтегазоносности фундамента в центральной части Западной Сибири с применением алгоритмов нечеткой логики и системного анализа // Науки о Земле. 2015. № 2.
16. **Кафган В. И., Цветков В. Я.** О форме и содержании понятия «инфраструктура пространственных данных» // Геодезия и картография. 2013. № 6. С. 46–50.

9. Расширение базы геоданных ГИС за счет включения новых данных по ГНСС, ДЗЗ и наблюдательным геофизическим сетям, данных о сплоченности морского льда и движениях земной поверхности в пунктах ГНСС; разработка архитектуры ГИС-приложения и интеграция алгоритмов пространственного анализа данных о геофизических полях в среду ГИС

Номер гос. регистрации № 0145-2014-0007

Руководитель: г.л.н.с., д.т.н. В. И. Кафтан

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

9.1. Цели и задачи проекта

Основной целью проекта являлась разработка современной аналитической ГИС, предназначенной для хранения, интеграции, визуализации и предоставления пользователям пространственных геофизических данных для их дальнейшего анализа и интерпретации.

Основными задачами в разработке ГИС являются интеграция в единой геоинформационной среде баз данных по наукам о Земле и реализация системы представления пространственных данных, которая обеспечивает взаимодействие между ГИС и пользователями посредством тонкого клиента [1–3].

Ранее создаваемые пользовательские ГИС, предназначенные для анализа различных геолого-геофизических данных, обладали рядом существенных недостатков, в том числе:

- необходимость установки на рабочие места пользователей дорогостоящего программного обеспечения;
- высокие требования к квалификации пользователей ГИС;
- отсутствие возможности работы с ГИС в режиме удаленного доступа;
- невозможность многопользовательского режима;
- узкая тематическая направленность.

ГИС, разработанная в ГЦ РАН в рамках настоящего проекта, предназначена для комплексного анализа геолого-геофизических данных и данных ДЗЗ и свободна от вышеперечисленных недостатков:

- Специализированное программно-аппаратное обеспечение необходимо лишь разработчику системы. Пользователю предлагаемой ГИС требуется только программное обеспечение, находящееся в свободном доступе, для просмотра веб-страниц.

- Предлагаемая реализация интеллектуальной ГИС в виде приложения на основе картографического веб-сервиса обладает ясным и простым в обращении интерфейсом и не требует специальной подготовки и квалификации пользователя.
- Система функционирует в режиме удаленного доступа и требует только наличия сетевого соединения.

В 2014 гг. исследовательские работы в рамках проекта велись по следующим основным направлениям:

- Расширение базы геопространственных данных и метаданных за счет включения новых тематических данных по ГНСС, ДЗЗ и наблюдательным геофизическим сетям, данных о сплоченности морского льда и движениях земной поверхности в пунктах ГНСС.
- Совершенствование и расширение инструментария и функциональных возможностей веб-интерфейса для взаимодействия с картографическими веб-сервисами, опубликованными в рамках проекта.

9.2. Цифровые пространственные данные по геофизике

Основу исследований и разработок, проводимых в рамках проекта, представляют цифровые геопространственные данные о физических полях Земли. В результате исследований по проекту были обработаны и помещены в ГИС новые цифровые тематические слои по наукам о Земле.

Были добавлены данные по тепловой модели верхней мантии, характеризующие распределение температуры на глубинах 50–300 км [4]. Температура верхней мантии рассчитана по данным о распределении сейсмических скоростей с использованием уравнений физики минералов (рис. 9.1).

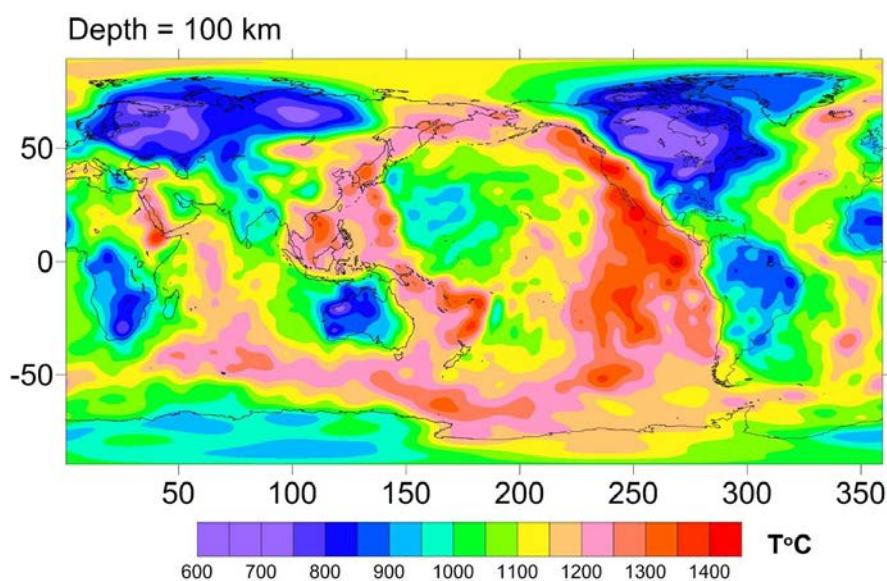


Рисунок 9.1 – Значения температуры верхней мантии на глубине 100 км

Среди прочего, была добавлена томографическая модель внутренней структуры верхней мантии [5] (рис. 9.2).

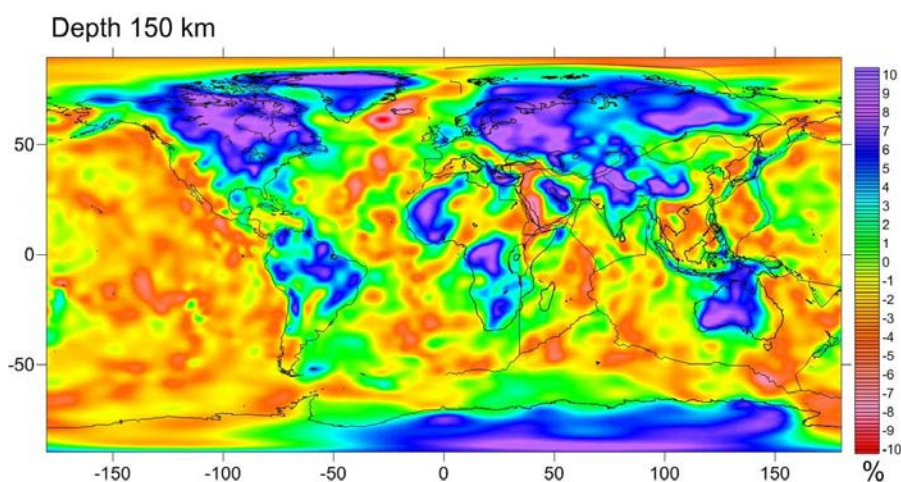


Рисунок 9.2 – Значения вариаций скорости поперечных волн в процентах от заданного стандартного значения для слоя на глубине 150 км

В рамках работ по проекту был также обновлен созданный ранее тематический слой по ГНСС. Слой содержит информацию о постоянно действующих пунктах, оборудованных приемной аппаратурой ГЛОНАСС/GPS. Было добавлено описание пунктов наблюдений, расположенных на территории России и сопредельных государств.

Для исследования сплоченности морского льда использовались данные ДЗЗ международного проекта GHRSSST (GODAE High Resolution Sea Surface Temperature) эксперимента по усвоению океанографических параметров GODAE (Global Ocean Data Assimilation Experiment). Они представляют собой среднесуточные поля температуры поверхности океана (ТПО), представленные на регулярной сетке с шагом $0,25^\circ$ по широте и долготе и обработанные методом оптимальной интерполяции, начиная с сентября 1981 г. по настоящее время. Данные получены с помощью радиометров AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), установленных на спутниках NOAA.

9.3. Развитие геопортала ГЦ РАН

В 2014 г. была введена в строй обновленная версия инструмента интерактивного доступа к данным проекта. Основной компонент интерактивного получения и анализа геопространственных данных по геофизике представлен картографическими веб-сервисами единого геопортала ГИС «Данные наук о Земле по территории России» (<http://gis.gcras.ru>). В качестве основы при реализации геопортала выбрано свободно распространяемое ПО ESRI Geoportal Server. Данный программный продукт предназначен для организации интерактивного доступа к публикуемым картографическим веб-сервисам с использованием стандартных протоколов обмена картографической информацией.

В интерфейсе геопортала предоставлены возможности использования различных вариантов представления цифровых геопространственных данных с использованием совре-

менных сетевых сервисов, таких как ArcGIS.com Map и Google Earth, в виде файлов для настольных приложений ESRI ArcMap или ESRI ArcGIS Explorer или в виде модулей для интерфейса программирования приложений ArcGIS JavaScript API (рис. 9.3).

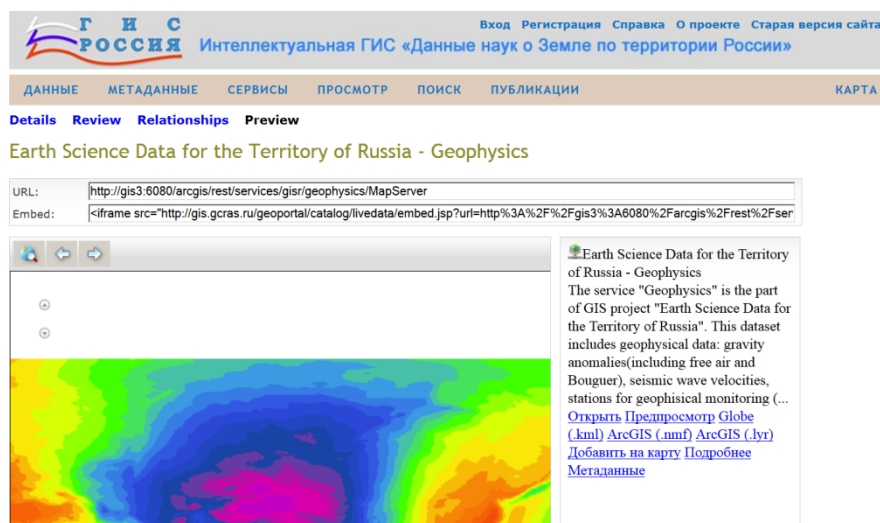


Рисунок 9.3 – Интерфейс для предварительного просмотра метаданных картографического веб-сервиса. Имеется выбор вариантов представления данных

Веб-интерфейс был модифицирован с целью получения возможности обращаться непосредственно к определенному цифровому слою с его главной страницы, где имеется доступ не только к геолого-геофизическим данным, но также и к политико-экономическим, экологическим, демографическим, медицинским и другим цифровым слоям ГИС [6].

Интерфейс геопортала позволяет вызывать из базы данных и просматривать цифровые слои геолого-геофизической информации, просматривать метаданные, создавать свои собственные цифровые слои путем использования ресурсов геопортала, сохранять и выводить их на печать, измерять площадь и длину объектов, получать их координаты, делать собственные комментарии в виде закладок и др. (рис. 9.4).

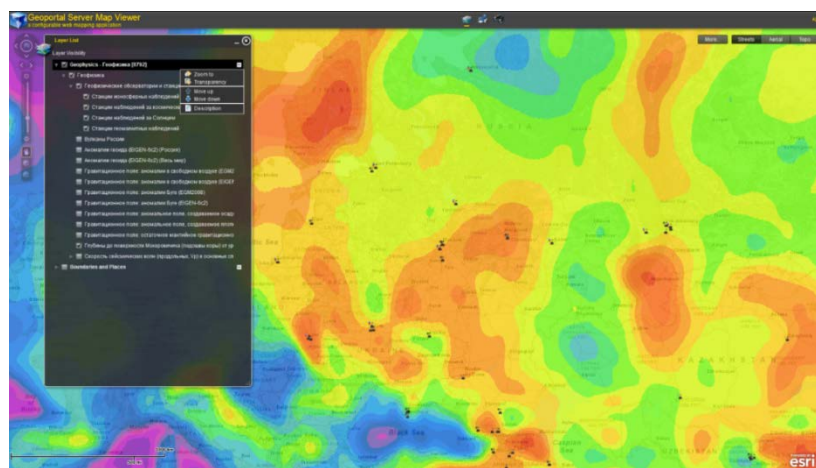


Рисунок 9.4 – Интерфейс для просмотра и редактирования картографической информации в режиме онлайн

Функциональные возможности геопортала позволяют эффективно и быстро организовать многоуровневый авторизованный доступ к тем или иным картографическим сервисам. Для реализации этой функции имеется возможность регистрации пользователей с последующим присвоением определенных прав.

Интерфейс обеспечивает сравнительный пространственный анализ разных тематических слоев с целью обеспечения новой информацией исследователей в области наук о Земле. Эти возможности делают данный веб-сервис эффективным аналитическим инструментом при анализе и интерпретации геофизических данных.

Список публикаций по результатам проекта

Статьи в журналах

Tesauro M., **Kaban M. K.**, Mooney W. D., Cloetingh S. A. P. L. NACr14: A 3D model for the crustal structure of the North American Continent // *Tectonophysics*. 2014. Vol. 631, pp. 65–86. doi: 10.1016/j.tecto.2014.04.016 Импакт-факторы: WoS 2, 866; Scopus 1,817.

Список использованных источников

1. Березко А. Е., Гвишиани А. Д., Соловьев А. А., Красноперов Р. И., Рыбкина А. И., Лебедев А. Ю. Интеллектуальная ГИС «Данные наук о Земле по территории России» / В кн. Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. – М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). 2010. с. 210–218.
2. Березко А. Е., Гвишиани А. Д., Соловьев А. А., Красноперов Р. И., Рыбкина А. И., Лебедев А. Ю. Многодисциплинарная ГИС для наук о Земле // Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: Материалы Международной научно-практической конференции. 16–20 мая 2011 г., г. Майкоп (Россия) – Майкоп: Изд-во. «Магарин О.Г.», 2011. с. 37–43.
3. 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.
4. Tesauro M., Audet P., **Kaban M. K.**, Bürgmann R. Cloetingh S. The effective elastic thickness of the continental lithosphere: Comparison between rheological and inverse approaches // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2012. Vol. 13. No. 9. Q09001. doi: 10.1029/2012GC004162
5. 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.
6. Любовцева Ю. С., Макоско А. А., Воронова Е. В., Пятыгина О. О., Шibaева А. А., Красноперов Р. И. Медицинская геоинформационная система России в условиях изменяющегося климата / В сб. «Влияние космической погоды на человека в космосе и на земле» (ИКИ РАН, Москва 4–8 июня 2012 г.). М.: ИКИ РАН. 2013. С. 435–449.

10. Разработка метода спектрально-временного анализа (СВАН) для распознавания магнитных бурь в наблюдениях магнитного поля Земли; разработка метода СВАН для оценивания параметров пульсаций магнитного поля Земли с использованием полигармонических моделей и параллельных вычислений

Номер гос. регистрации № 0145-2014-0012
Руководитель: гл.н.с., д.т.н. В. Г. Гетманов

Данный проект выполнялся в рамках Программы ОНЗ РАН № 7 «Геофизические данные: анализ и интерпретация». В 2014 году рассматривался метод спектрально-временного анализа (СВАН) наблюдений сигналов геомагнитного поля (ГМП) для распознавания магнитных бурь. Использовался математический аппарат функций частотно-временных распределений (ЧВР), базирующийся на вычислении скользящих дискретных преобразований Фурье и локальных функций ЧВР. Снижение погрешностей СВАН было реализовано на основе методов простого и взвешенного усреднения локальных функций ЧВР. Для оценивания погрешностей СВАН произведено статистическое моделирование. Осуществлено тестирование предложенного СВАН на наблюдениях сигналов ГМП с магнитными бурями для системы магнитных обсерваторий.

Предложенный метод СВАН может быть эффективно использован в задаче распознавания магнитных бурь в наблюдениях ГМП, применен для вычисления индексов геомагнитной активности на основе спектрально-временных представлений и может дополнить существующие технологии распознавания магнитных бурь, основанные на вычислении индексов геомагнитной активности во временной области.

Здесь метод СВАН базируется на введении функции частотно-временного распределения (ЧВР) $P(\omega, t)$, определяющей величину, пропорциональную энергии сигнала, приходящуюся на интервалы $\omega, \omega + d\omega, t, t + dt$. Запишем дифференциальное равенство и интеграл полной энергии:

$$dE = P(\omega, t)d\omega dt, \quad E = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega, t)dt. \quad (10.1)$$

Представим функцию ЧВР на прямоугольной сетке значений частот и моментов времени $\omega_0 < \omega_1 < \omega_2 < \dots, < \omega_{N_1}, t_0 < t_1 < t_2 < \dots, < t_{N_2}$; положим, что вне данной сетки эта функция ЧВР равна нулю. В точках $\bar{\omega}_k$ и \bar{t}_i , $\omega_k \leq \bar{\omega}_k < \omega_{k+1}, t_i \leq \bar{t}_i < t_{i+1}$ определим значение функции ЧВР $P(\bar{\omega}_k, \bar{t}_i)$. Вполне можно считать, что $P(\omega, t) = P(\bar{\omega}_k, \bar{t}_i)$ для $\omega_k \leq \omega < \omega_{k+1}, t_i \leq t < t_{i+1}, k = 0, 1, \dots, N_1 - 1, i = 0, 1, \dots, N_2 - 1$. В частном случае положим, что $\omega_k = \bar{\omega}_k, t_i = \bar{t}_i$, тогда $P(\omega, t) = P(\omega_k, t_i)$. Примем $d\omega_k = \omega_{k+1} - \omega_k, k = 0, 1, \dots, N_1 - 1, dt_i = t_{i+1} - t_i, i = 0, 1, \dots, N_2 - 1$, просуммируем, также как и в (10.1):

$$dE_{k,i} = P(\omega_k, t_i) d\omega_k dt_i, \quad E = \sum_{k=0}^{N_1-1} \sum_{i=0}^{N_2-1} P(\omega_k, t_i) d\omega_k dt_i. \quad (10.2)$$

Произведем построение функции ЧВР на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Зададим дискретизованный сигнал $y(Ti)$ в точках $i = 0, 1, \dots, N-1$. Сформируем дискретные значения частот и моментов времени:

$$\omega_k = \frac{2\pi}{NT} k = \Delta\omega k, \quad \Delta\omega = \frac{2\pi}{NT}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad t_i = Ti, \quad i = 0, 1, \dots, N-1.$$

С помощью ДПФ определим полигармоническую модель для рассматриваемого сигнала с амплитудами гармоник $C(k)$ и частотами $\omega_k = \Delta\omega k$:

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

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

С использованием величины $|C(k)|^2 = C^*(k)C(k)$ определим энергию сигнала, приходящуюся на интервал времени длительностью TN и гармонику с частотой $\Delta\omega k$:

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} y^2(Ti) = N \sum_{k=0}^{N-1} |C(k)|^2.$$

Примем допущение, что энергия гармоники с частотой $\Delta\omega k$ равномерно распределяется по дискретным моментам времени Ti , $i = 0, 1, \dots, N-1$. Запишем сумму:

$$E = N \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{|C(k)|^2}{N}.$$

Получим выражение для функции ЧВР $P(\Delta\omega k, Ti)$ на основе ДПФ, аналогично (10.2):

$$E = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{|C(k)|^2}{\Delta\omega T} \cdot \Delta\omega \cdot T, \quad E = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} P(\Delta\omega k, Ti) \cdot \Delta\omega \cdot T,$$

$$P(\Delta\omega k, Ti) = \frac{|C(k)|^2}{\Delta\omega T}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad i = 0, 1, \dots, N-1. \quad (10.3)$$

Введем N_{1j}, N_{2j} – граничные точки для скользящих локальных интервалов размером N точек с единичным шагом скольжения $N_{1j} = j-1$, $N_{2j} = N_{1j} + N - 1$, $j = 1, \dots, m$,

$m = N_f - N + 1$ – число скользящих локальных интервалов, j – номер локального интервала, $N_f = mN$.

Вычислим скользящие ДПФ для скользящих локальных интервалов:

$$C_j(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=N_{1j}}^{N_{2j}} y(Ti) e^{-\frac{2\pi k(i-N_{1j})}{N}}, \quad j=1, \dots, m, \quad k=0, 1, \dots, N-1.$$

На основе указанных ДПФ определим скользящие локальные модельные функции ЧВР $P_j(\Delta\omega k, Ti)$ для последовательности локальных интервалов с номерами $j=1, \dots, m$:

$$P_j(\Delta\omega k, Ti) = \frac{1}{2\pi} |C_j(k)|^2, \quad N_{1j} \leq i \leq N_{2j}, \quad k=0, 1, \dots, N-1,$$

$$P_j(\Delta\omega k, Ti) = 0, \quad 0 \leq i < N_{1j}, \quad N_{2j} < i \leq N_f - 1, \quad k=0, 1, \dots, N-1.$$

Для частоты $\Delta\omega k$ и момента времени Ti величины $P_j(\Delta\omega k, Ti)$ могут служить в качестве локальных оценок значений исходной функции ЧВР. Оценка функции ЧВР $P(\Delta\omega k, Ti)$ для частоты $\Delta\omega k$ и момента времени Ti может быть представлена в виде взвешенной суммы локальных оценок:

$$P(\Delta\omega k, Ti) = \sum_{j=1}^m Q(i, j) P_j(\Delta\omega k, Ti), \quad i=0, \dots, N_f - 1, \quad m = N_f - N + 1, \quad (10.4)$$

где $Q(i, j)$ – двумерная функция взвешенного усреднения.

Нетрудно убедиться в том, что индекс j в общем случае для (10.4) должен удовлетворять неравенствам $1 \leq \bar{J}_{1i} \leq j \leq \bar{J}_{2i} \leq m$, где предельные верхние и нижние граничные точки \bar{J}_{1i} , \bar{J}_{2i} для суммирования находятся следующим образом:

$$\bar{J}_{1i} = 1, \quad i=0, \dots, N-1,$$

$$\bar{J}_{1i} = i+1-N, \quad i=N, \dots, N_f-1,$$

$$\bar{J}_{2i} = i+1, \quad i=0, \dots, m-1,$$

$$\bar{J}_{2i} = m, \quad i=m, \dots, N_f-1.$$

На практике, суммирование по индексу j осуществляется в окне суммирования с нижними и верхними граничными точками J_{1i} , J_{2i} , которые удовлетворяют неравенствам $\bar{J}_{1i} \leq J_{1i} \leq j \leq J_{2i} \leq \bar{J}_{2i}$. Эти точки могут быть определены следующими формулами:

$$J_{0i} = \text{ent}((J_{02i} - J_{01i})/2), \quad J_{1i} = J_{0i} - J_m, \quad J_{2i} = J_{0i} + J_m, \quad i = J_m, \dots, N_f - J_m,$$

где $J_{2i} - J_{1i} + 1 = 2J_m + 1 = J_0$ – ширина окна суммирования.

Простое усреднение в окне суммирования применяется, когда величины погрешностей оценок локальных ЧВР в точке Ti для частоты $\Delta\omega k$ при введенной ширине окна являются одинаковыми. В этом случае значения локальных функций ЧВР $P_j(\Delta\omega k, Ti)$, $J_{1i} \leq j \leq J_{2i}$ могут быть представлены следующей моделью:

$$P_j(\Delta\omega k, Ti) = P_0(\Delta\omega k, Ti) + \Delta w_{i,j}, \quad (10.5)$$

где $P_0(\Delta\omega k, Ti)$ – значение локальной функции ЧВР для $\Delta\omega k$ и Ti , погрешности $\Delta w_{i,j}$ – случайные некоррелированные числа с нулевым математическим ожиданием и дисперсиями $\sigma_{i,j}^2$, для которых выполняются равенства $\sigma_{i,J_{1i}}^2 = \sigma_{i,J_{1i}+1}^2 \dots = \sigma_{i,J_{2i}}^2 = \sigma_i^2$; предполагается, что для (10.5) отсутствуют систематические погрешности, что возможно допустить при условии малых J_0 . Для такой модели общеизвестно, что оптимальная оценка локальной функции ЧВР для $\Delta\omega k$ и Ti производится на основе простого усреднения:

$$P_0^\circ(\Delta\omega k, Ti) = \frac{1}{J_0} \sum_{j=J_{1i}}^{J_{2i}} P_j(\Delta\omega k, Ti).$$

Очевидно, что в этом случае двумерная функция простого усреднения $Q_E(i, j)$ для точек $i = J_0, \dots, N_f - J_0$ и $J_{1i} \leq j \leq J_{2i}$ будет иметь вид $Q_E(i, j) = 1/J_0$. Для точек $i = 0, \dots, J_0 - 1$ и $J_{1i} = J_{01i}$, $J_{2i} = J_{02i}$, $J_{1i} \leq j \leq J_{2i}$ будет иметь место равенство $Q_E(i, j) = 1/(i+1)$; для точек $i = N_f - J_0 + 1, \dots, N_f - 1$ и $J_{1i} = J_{01i}$, $J_{2i} = J_{02i}$, $J_{1i} \leq j \leq J_{2i}$ будет справедливо равенство $Q_E(i, j) = 1/(N_f - i)$. Для остальных точек i, j в прямоугольнике $i = 0, \dots, N_f - 1$, $j = 1, \dots, m$ функция простого усреднения будет равна нулю $Q_E(i, j) = 0$. Результат простого усреднения локальных ЧВР-функций представляется в виде формулы, позволяющей вычислить оценку функции ЧВР $P_E^\circ(\Delta\omega k, Ti)$:

$$P_E^\circ(\Delta\omega k, Ti) = \sum_{j=J_{1i}}^{J_{2i}} Q_E(i, j) P_j(\Delta\omega k, Ti), \quad i = 0, \dots, N_f - 1, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1. \quad (10.6)$$

Взвешенное усреднение в окне суммирования применяется, когда величины погрешностей оценок локальных ЧВР в точке Ti для частоты $\Delta\omega k$ для введенного окна не являются одинаковыми. В этом случае значения локальных функций ЧВР $P_j(\Delta\omega k, Ti)$, $J_{1i} \leq j \leq J_{2i}$ могут быть представлены моделью, совпадающей по форме с (10.5); отличие состоит в том, что дисперсии $\sigma_{i,j}^2$, $J_{1i} \leq j \leq J_{2i}$ погрешностей для окна суммирования не являются одинаковыми для заданных Ti и $\Delta\omega k$. Для такой модели оптимальная оценка локальной функции ЧВР для $\Delta\omega k$ и Ti производится на основе следующей формулы:

$$P_G^\circ(\Delta\omega k, Ti) = \sum_{j=J_{1i}}^{J_{2i}} Q_G(i, j) P_j(\Delta\omega k, Ti), \quad i = 0, \dots, N_f - 1, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (10.7)$$

где функция весового усреднения $Q_G(i, j)$, учитывающая неодинаковые дисперсии имеет вид:

$$Q_G(i, j) = \left(\frac{1}{\sigma_{i,j}^2} \right) / \left(\sum_{k=J_{1i}}^{J_{2i}} \frac{1}{\sigma_{i,k}^2} \right), \quad J_{1i} \leq j \leq J_{2i}.$$

Дисперсии $\sigma_{i,j}^2$, $J_{1i} \leq j \leq J_{2i}$, как правило, не бывают точно известными. Воспользуемся возможной моделью дисперсий $\sigma_{Mi,j}^2$. Как правило, погрешности больше на концах весового окна, чем в его центре. В качестве оценки сверху для неизвестных величин дисперсий примем кусочно-линейную модельную функцию:

$$\sigma_{Mi,j} = \sigma_{0M1} + \sigma_{0M2}(-j + J_{1i}), \quad j = J_{1i}, \dots, J_{1i} + J_m,$$

$$\sigma_{Mi,j} = \sigma_{0M1} + \sigma_{0M2}(j - (J_m + 1)), \quad j = J_m + 2, \dots, J_{2i}.$$

Параметры σ_{0M1} , σ_{0M2} выберем таким образом, чтобы выполнялись неравенства $\sigma_{i,j} < \sigma_{Mi,j}$, $J_{1i} \leq j \leq J_{2i}$. Тогда, будем иметь:

$$Q_{MG}(i, j) = \left(\frac{1}{\sigma_{Mi,j}^2} \right) / \left(\sum_{k=J_{1i}}^{J_{2i}} \frac{1}{\sigma_{Mi,k}^2} \right).$$

Был сформирован модельный сигнал $y_M(Ti)$, приближенно имитировавший спокойные и возмущенные магнитной бурей наблюдения ГМП:

$$y_M(Ti) = y_1(Ti) + y_2(Ti), \quad i = 0, 1, \dots, N_f - 1,$$

где $y_1(Ti)$ – составляющая, соответствующая спокойному состоянию ГМП, $y_2(Ti)$ – возмущенному магнитной бурей состоянию ГМП, $T = 60$ с – шаг дискретизации, $N_f = 1440 \cdot 30 = 43200$ – число наблюдений за месяц. Составляющая $y_1(Ti)$ приближенно имитировала суточные низкочастотные колебания ГМП $y_1(Ti) = E_{10} - E_1 |\cos(2\pi f_1 Ti + \phi_{01})| + w_1(Ti)$, где $f_1 = 1/2T_1$, $T_1 = 1440 \cdot 60$ – суточный период, ϕ_{01} – начальная фаза, E_{10} – постоянная составляющая ГМП, E_1 – средняя амплитуда суточных колебаний ГМП, $w_1(Ti)$ – шум с σ_0 . Вторая составляющая $y_2(Ti)$ представлена формулой $y_2(Ti) = E_2(Ti) \cos(\phi_2(Ti)) + w_2(Ti)$, где $E_2(Ti)$ – переменная амплитуда второй составляющей, которая была сформирована на основе модулирующей функции $G_0(Ti)$ типа гауссовой

$$G_0(Ti) = \exp\left(-\alpha_1 \left(\frac{i-I_0}{I_0}\right)^2\right), \quad i = 0, 1, \dots, I_0 - 1,$$

$$G_0(Ti) = \exp\left(-\alpha_2 \left(\frac{i-I_0}{I_0}\right)^2\right), \quad i = I_0, \dots, N_f - 1,$$

$$E_2(Ti) = E_{20}G_0(Ti),$$

E_{20} – средняя амплитуда, I_0 определяет положение во времени магнитной бури, α_1, α_2 – регулируют крутизну для модулирующей функции, которая имитирует внезапное начало, нарастание и спад модельной магнитной бури. Фазовая функция $\varphi_2(Ti) = 2\pi f_2 Ti + \varphi_{02}$, где f_2, φ_{02} – некоторая заданная частота и начальная фаза колебаний магнитной бури. Дисперсия шума $w_2(Ti)$ зависит от времени $\sigma(Ti) = \sigma_0 \alpha_0 G_0(Ti)$, $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$.

Для моделирования были приняты следующие значения параметров: $E_0 = 43700$, $E_{10} = 50$, $f_1 = 5,71 \cdot 10^{-6}$ Гц, $\varphi_{01} = 0,2$, $\sigma_0 = 1,0$, $E_{20} = 200$, $\alpha_1 = 315$, $\alpha_2 = 35$, $I_0 = 13650$, $f_2 = 1,62 \cdot 10^{-5}$ Гц, $\varphi_{02} = 0$, $\alpha_0 = 10,0$. На рис. 10.1 изображена реализация $y(Ti)$.

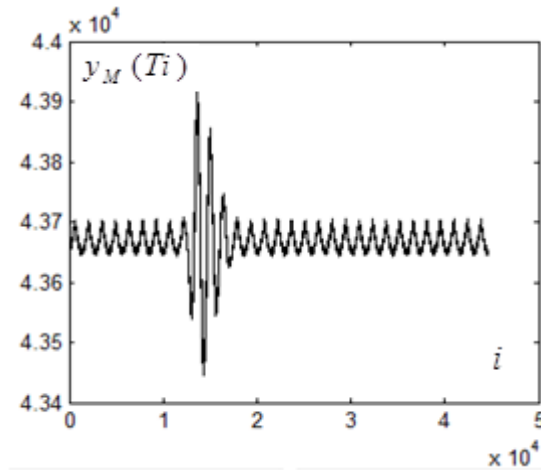


Рисунок 10.1 – Реализация $y_M(Ti)$ модельного сигнала ГМП с магнитной бурей

На рис. 10.2 помещена СВАН-диаграмма $E(k, i) = (P(\Delta F k, Ti))^{1/2}$, $\Delta F = \Delta\omega / 2\pi$ для сигнала рис. 10.1. Интервал, на котором анализировался сигнал, ограничивался точками $\bar{N}_{01} = 5000$, $\bar{N}_{02} = 25000$, параметр ДПФ – $N = 4096$, СВАН-диаграмма была сформирована для точек $N_{01} \leq i \leq N_{02}$, $N_{01} = \bar{N}_{01} + N / 2 = 7048$, $N_{02} = \bar{N}_{02} - N / 2 = 22952$. Число дискретных частот в ДПФ-спектре бралось равным $K_p = 10$, частотный диапазон составлял $(0 \div (K_p - 1) / (NT)) = (0 \div 3,66 \cdot 10^{-5})$ Гц. Применялось простое усреднение с $Q_E(i, j)$ по (10.6, 10.7) с $J_m = 3$.

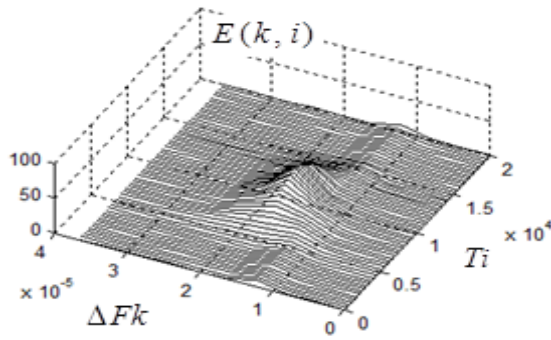


Рисунок 10.2 – Амплитудная СВАН-диаграмма модельного сигнала ГМП с магнитной бурей

На предложенном модельном сигнале было произведено оценивание погрешностей СВАН. В качестве референтной была взята функция $P_0(\Delta\omega k, Ti)$ без шумов $-\sigma_0 = 0$ и без усреднения ($J_m = 0$). Вычислялись СВАН-диаграммы простого и взвешенного усреднения для различных величин J_m при фиксированном значении σ_0 . Формировались последовательности реализаций наблюдений $y_s(Ti)$, СВАН-диаграммы $P_0(\Delta\omega k, Ti)$, $P_{Es}(\Delta\omega k, Ti, J_m)$, $P_{Gs}(\Delta\omega k, Ti, J_m)$, где $s = 1, \dots, M$, s – номер реализации, M – число реализаций. Вычислялись погрешности $dS_E(J_m)$ и $dS_G(J_m)$:

$$dP_{Es}(\Delta\omega k, Ti, J_m) = P_0(\Delta\omega k, Ti) - P_{Es}(\Delta\omega k, Ti, J_m),$$

$$dS_E(J_m) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{s=1}^M \frac{1}{K_p(N_{02} - N_{01} + 1)} \sum_{k=0}^{K_p-1} \sum_{i=N_{01}}^{N_{02}} dP_{Es}^2(\Delta\omega k, Ti, J_m)},$$

$$dP_{Gs}(\Delta\omega k, Ti, J_m) = P_0(\Delta\omega k, Ti) - P_{Gs}(\Delta\omega k, Ti, J_m),$$

$$dS_G(J_m) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{s=1}^M \frac{1}{K_p(N_{02} - N_{01} + 1)} \sum_{k=0}^{K_p-1} \sum_{i=N_{01}}^{N_{02}} dP_{Gs}^2(\Delta\omega k, Ti, J_m)}.$$

На рис. 10.3 помещены результаты статистического моделирования – относительные погрешности $\delta_E(J_m) = dS_E(J_m) / dS_E(0)$, $\delta_G(J_m) = dS_G(J_m) / dS_G(0)$. Параметры принимали значения: $N = 4096$, $\sigma_0 = 2,0$, $\sigma_{0M1} = 2$, $\sigma_{0M2} = 0,1$.

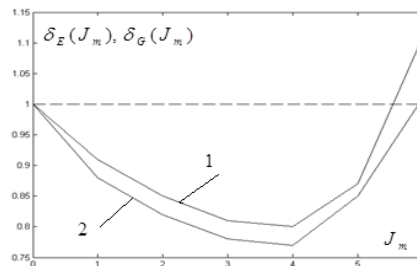
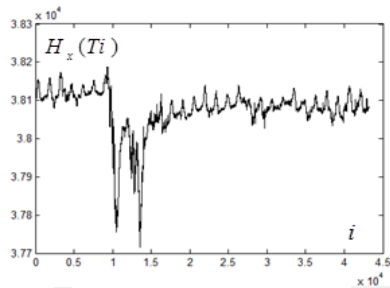


Рисунок 10.3 – Относительные погрешности с простым и взвешенным усреднением

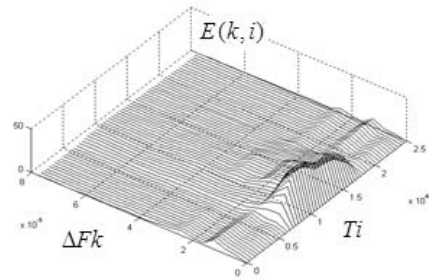
На рис. 10.3 помещены графики относительных погрешностей с простым (индекс 1) и взвешенным усреднением (индекс 2). Простое усреднение снижает погрешность СВАН-диаграммы на $\approx 15\text{--}20\%$, взвешивание снижает на $\approx 2\text{--}4\%$. Возрастание кривых $\delta_E(J_m)$, $\delta_G(J_m)$ связано с систематическими погрешностями при увеличении окна суммирования.

Для тестирования алгоритма СВАН были использованы магнитограммы обсерватории АВГ. На рис. 10.4 изображена магнитограмма $H_x(Ti)$ с минутной дискретизацией, произведенная в течение месяца, начиная с 01.10.2004, 0 ч. 00 м. В интервале времени начиная с 06.10.2004 по 12.10.2004 (9000–18000 мин.) имела место магнитная буря.

СВАН-диаграмма на рис. 10.5 соответствует временному интервалу с точками $N_{01} = 1$, $N_{02} = 25000$, реализовывались скользящие ДПФ с $N = 4096$, $K_p = 20$, $(0 \div (K_p - 1) / (NT)) = (0 \div 7,73 \cdot 10^{-5})$ Гц. Полученные здесь СВАН-диаграммы реализованы с повышенной точностью по сравнению со СВАН-диаграммами отчета 2013 года.



**Рисунок 10.4 – Обсерватория АВГ.
Магнитограмма H_x**



**Рисунок 10.5 – Обсерватория АВГ.
СВАН-диаграмма H_x**

Участки СВАН-диаграмм, соответствующие спокойным состояниям ГМП, сосредоточены в полосе со средней частотой, соответствующей суточной частоте; возникновение магнитной бури приводит к расширению частотной полосы и повышению амплитуд.

Рассмотрим задачу аппроксимации наблюдаемого сигнала $z(t)$ конечным набором тригонометрических функций:

$$\{a_l \cos \omega_l t, b_l \sin \omega_l t\}, \quad l = 1, \dots, L,$$

где L – число используемых гармоник. Будем считать, что все частоты $f_l = \omega_l / 2\pi$ упорядочены по величине и лежат в заданном интервале $[f_1, f_2]$. При заданном числе гармоник задача сводится к поиску частот и амплитуд, минимизирующих функционал

$$F(\vec{\omega}, \vec{a}, \vec{b}) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left(z(t) - \sum_{l=1}^L (a_l \cos \omega_l t + b_l \sin \omega_l t) \right)^2 W(t) dt.$$

Здесь стрелка над символом означает, что соответствующая величина является мерным вектором, τ – временной интервал, для которого выполняется аппроксимация, $W(t)$ – весовая функция. Если набор частот задан, то определение оптимальных значений амплитуд \vec{a} и \vec{b} сводится к решению линейной системы, составленной из условий минимума функционала F . Выполнив дифференцирование, получим:

$$\sum_{l=1}^L (A_{ml}a_l + C_{ml}b_l) = Z_m^{(a)}, \quad \sum_{l=1}^L (C_{lm}a_l + B_{ml}b_l) = Z_m^{(b)}.$$

Здесь введены обозначения:

$$A_{ml} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \cos \omega_m t \cos \omega_l t W(t) dt = A_{lm}, \quad B_{ml} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \sin \omega_m t \sin \omega_l t W(t) dt = B_{lm},$$

$$C_{ml} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \cos \omega_m t \sin \omega_l t W(t) dt, \quad Z_m^{(a)} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} z(t) \begin{pmatrix} \cos \omega_k t \\ \sin \omega_l t \end{pmatrix} W(t) dt.$$

Из приведенных формул видно, что матрица коэффициентов системы уравнений близка к диагональной. То есть, по крайней мере в этом случае вычисление «спектральных компонент» может быть осуществлено весьма эффективно. Для формального перехода от непрерывного сигнала к дискретному следует выбрать весовую функцию в виде «гребенки Дирака». В этом случае интегрирование по времени следует заменить на суммирование. Получим:

$$\frac{1}{2n} \sum_{k=0}^n \cos kx = \frac{1}{2n} \sin \left(\frac{n+1}{2} x \right) \cos \left(\frac{nx}{2} \right) \operatorname{cosec} \left(\frac{x}{2} \right) \equiv \Phi_1(n, x),$$

$$\frac{1}{2n} \sum_{k=1}^n \sin kx = \frac{1}{2n} \sin \left(\frac{nx}{2} \right) \sin \left(\frac{n+1}{2} x \right) \operatorname{cosec} \left(\frac{x}{2} \right) \equiv \Phi_2(n, x).$$

Элементы матриц A , B , C можно представить в виде:

$$A_{ml} = \Phi_1(N, \Omega_{ml}^-) + \Phi_1(N, \Omega_{ml}^+),$$

$$B_{ml} = \Phi_1(N, \Omega_{ml}^-) - \Phi_1(N, \Omega_{ml}^+),$$

$$C_{ml} = \Phi_2(N, \Omega_{ml}^-) + \Phi_2(N, \Omega_{ml}^+),$$

$$\Omega_{ml}^{\pm} = (\omega_m \pm \omega_l) \Delta t.$$

Видно, что и для дискретных сигналов при выполнении условий матрица коэффициентов в исходных уравнениях близка к диагональной. Наличие независимых от числа отсчетов N экстремумов означает, что все коэффициенты становятся одного порядка. В

этом случае предложенные оценки перестают быть справедливыми, а условие разрешимости системы приводит к ограничению разрешающей способности по частоте, что означает возможность двух-трехкратного увеличения частотного разрешения по сравнению с методом дискретного преобразования Фурье.

Вернемся теперь к определению значений частот. Зависимость функционала от этих параметров является нелинейной. Более того, в общем случае функционал, помимо глобального минимума, имеет несколько локальных, что существенно усложняет поиск. Ограничимся вариантом решения методом нулевого порядка: разобьем исходный интервал частот на K равных промежутков. Поиск оптимальных значений будем осуществлять перебором всех возможных комбинаций частот. Число перебираемых комбинаций частот при больших L по-прежнему экспоненциально возрастает с увеличением сложности модели, так что в отсутствие значительных вычислительных ресурсов мы вынуждены ограничиться тремя-пятью гармониками. Тем не менее, из приведенного ниже примера видно, что и в этом случае использование полигармонической модели вполне оправдано.

Приведем пример построения спектрально-временных диаграмм для пульсаций геомагнитного поля. В верхней части рис. 10.6 изображена компонента ГМП, зафиксированная на станции ААЕ, Аддис-Абеба. Запись была отфильтрована в диапазоне частот 8–20 мГц. Ниже, сверху вниз, приведены спектрально-временные диаграммы, построенные с использованием полигармонических моделей с двумя, тремя и шестью частотами, соответственно.

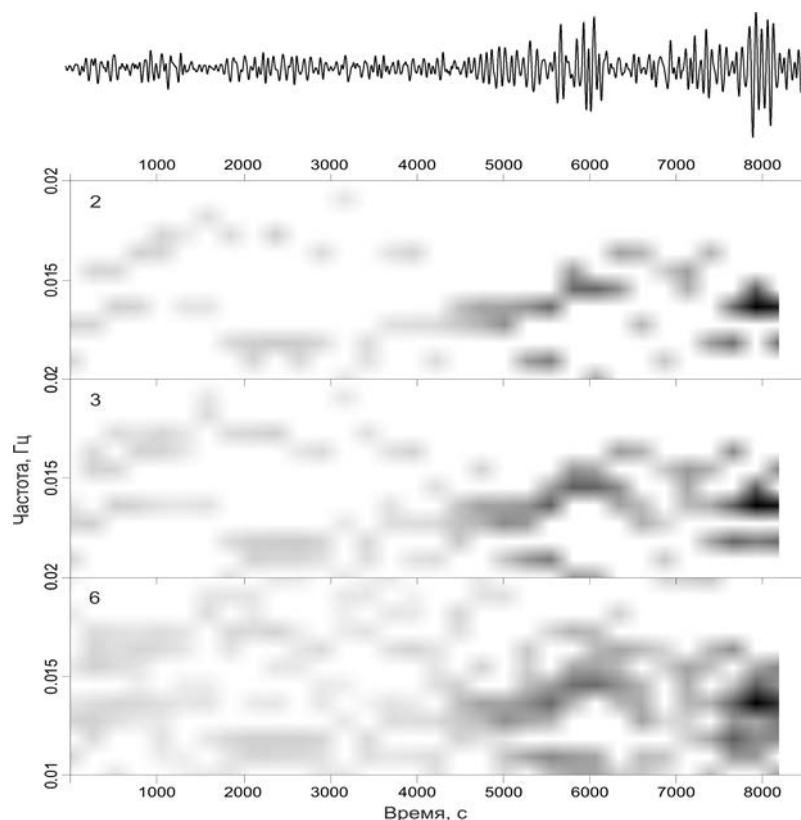


Рисунок 10.6 – Спектрально-временные диаграммы пульсаций ГМП

Предложенный метод СВАН на основе скользящих ДПФ и взвешенного усреднения локальных функций ЧВР адекватен рассматриваемой проблеме анализа сигналов ГМП магнитных бурь и позволяет получить дополнительную информацию относительно спектральных характеристик протекающих во времени физических процессов в магнитосфере. Интерпретация результатов СВАН наблюдений сигналов ГМП с магнитными бурями от системы обсерваторий позволяет сделать вывод, что предложенная электромеханическая модель магнитной бури является вполне реалистичной. Простое усреднение локальных функций ЧВР, как показало статистическое моделирование, позволяет снизить погрешности вычисления СВАН-диаграмм, в среднем, на $\approx 15\text{--}20\%$, введение взвешенного усреднения обеспечивает дополнительное снижение погрешностей на $\approx 2\text{--}4\%$. Полигармоническая модель, даже в случае небольшого числа используемых гармоник, может быть использована в качестве простого и эффективного инструмента анализа геомагнитных возмущений. При необходимости применения в полигармонической модели большего числа параметров можно воспользоваться ресурсами ГРИД.

Список публикаций по результатам проекта

Статьи в журналах

Гетманов В. Г., Сидоров Р. В. Фильтрация 1-секундных наблюдений от векторного и скалярного магнитометров на основе аппроксимационных кусочно-линейных моделей // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54. № 5. С. 670–677. Импакт-факторы: РИНЦ 0,429; WoS 0,510; Scopus 0,339.

Отчет по результатам проекта

Материалы исследований размещены в отчете «Физические поля Земли: анализ и интерпретация» по Программе ОНЗ РАН № 7 за 2014 год, часть 1, глава 1, параграф 1.4, стр. 46–55 и стр. 66–82.

11. Развитие новых методов распознавания аномальных событий на временных рядах обсерваторских наблюдений магнитного поля Земли и расширение сети геомагнитных наблюдений в РФ

Номер гос. регистрации № 0145-2014-0013

Руководитель: директор ГЦ, академик А. Д. Гвишиани

Целью работы является развитие математических методов автоматизированной обработки данных и их применение к анализу дискретных временных рядов геомагнитных наблюдений. В рамках данной работы анализ временных рядов направлен на распознавание всплесков векового ускорения главного магнитного поля Земли (ГМПЗ) как индикаторов геомагнитных джерков. Вариации ГМПЗ, регистрируемые на поверхности Земли и в космосе, меняются на временных масштабах от 1 года до десятков миллионов лет. Эти вариации содержат в себе различные проявления геомагнитного векового хода (ВХ), такие как западный дрейф, медленное ослабление геомагнитного диполя, расширение зоны аномально низкого поля в Южной Атлантике и дрейф Северного магнитного полюса. Причиной ВХ служат потоки во внешнем ядре Земли, либо конвективные, либо связанные с магнитогидродинамическими волнами, а также диффузионные процессы (напр., [1]). На временных интервалах до десятка лет менее явные вариации в ВХ обнаруживаются путем расчета второй временной производной поля, иными словами, векового ускорения (ВУ). При анализе обсерваторских данных можно наблюдать нерегулярные внезапные изменения полярности ВУ, происходящие менее чем за год. Эти события, именуемые геомагнитными джерками, имеют место на стыке двух временных интервалов, в течение которых ВХ меняется практически линейно. Несмотря на широкое изучение геомагнитных джерков на протяжении последних 30 лет, вопрос об их происхождении по-прежнему остается открытым. Они бывают как региональные, так и глобальные в своей пространственной протяженности с максимальным сдвигом по времени в 2–3 года между проявлениями на разных обсерваториях. После 1999 г. геомагнитные джерки были зафиксированы в 2003 [2] и 2007 гг. [3].

В работе также решаются задачи разработки методов распознавания аномалий на двумерных рядах геофизических данных. В настоящее время в задачах анализа геомагнитных измерений такие методы особо актуальны, поскольку с 2013 г. научное сообщество располагает спутниковыми данными высокой точности, представляющими собой двумерное распределение характеристик магнитного поля по поверхности Земли.

Третье направление исследований было связано непосредственно с непрерывной регистрацией и накоплением геомагнитных данных. Работы по вводу в эксплуатацию обсерватории «Климовская» в 2014 г. в основном касались установки визирной цели, требуемой для проведения измерений абсолютных значений (склонения, наклонения и полной напряженности) магнитного поля, и определения ее азимута с помощью высокоточных геодезических измерений.

11.1. Применение метода гравитационного сглаживания для изучения всплесков векового ускорения ГМПЗ

С недавних пор, с появлением спутниковых наблюдений магнитного поля Земли беспрецедентной точности, появилась возможность более глубокого исследования происхождения джерков. Благодаря этим данным, имеющим, в отличие от обсерваторских, глобальное покрытие земного шара, были построены весьма точные модели ГМПЗ за последнее десятилетие. Эти модели разложения ГМПЗ по сферическим гармоникам позволяют строить карты ВУ не только на поверхности Земли, но и на границе ядра и мантии.

Последние исследования 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. В частности, в работе [3] было показано, что полная энергия ВУ на границе ядра и мантии согласно модели CHAOS-2 [4] достигла максимума между 2005 и 2006 гг. и регионально была сосредоточена преимущественно в центральной части Атлантики (рис. 11.1а). Было показано, что фаза возрастания этого всплеска ВУ являлась причиной геомагнитного джерка, наблюдаемого на поверхности ядра около 2003 г., а фаза убывания всплеска привела к джерку 2007 г. Последний выявленный всплеск ВУ относится к 2009 г. (рис. 11.1б), а последний джерк – к 2011 г. [5].

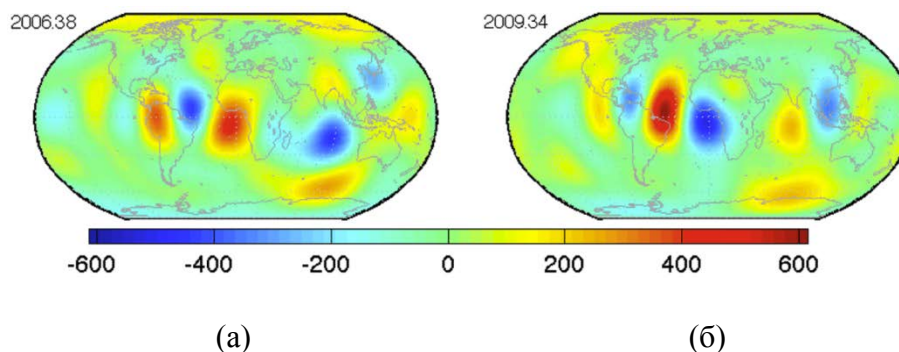


Рисунок 11.1 – Карты ВУ (радиальная компонента, нТл/год^2) на границе ядра и мантии за 2006 (а) и 2009 (б) гг. согласно модели разложения по сферическим гармоникам до степени 10 серии CHAOS, построенной по спутниковым данным [5]

За 2009 г. три участка ВУ чередующейся полярности, расположенные в атлантическом секторе, схожи по форме с участками ВУ в том же регионе за 2006 г., но имеют обратную полярность. ВУ в центральной части Атлантики в 2009 г. достигает 600 нТл/год^2 , что по модулю немного больше, чем в 2006 г., когда ВУ составило около -400 нТл/год^2 на том же участке. Менее очевидна взаимосвязь между другими участками аномального ВУ за 2006 и 2009 гг. В особенности это касается крупных и интенсивных участков в районе Индийского океана [5].

Итак, современные модели на базе спутниковых данных позволяют выделять всплески ВУ с большой точностью. В основном это связано с тем, что спутниковые данные по сравнению, например, с наземными наблюдениями, наиболее гладкие, не зашумленные и однородные с точки зрения географического покрытия. Однако это обстоятельство делает затруднительным изучение всплесков до 2000 г., когда спутниковые измерения магнитного поля Земли не проводились.

Таким образом, возникла задача разработки нового подхода к распознаванию всплесков ВУ ГМПЗ исключительно по обсерваторским данным. В 2014 г. задача состояла в апробации подхода на примере всплесков ВУ, имеющих место после 2000 г., и сравнении полученных результатов с результатами моделирования на базе спутниковых данных.

В основе предлагаемого подхода использовался метод гравитационного сглаживания [6, 7], разработанный на предыдущих этапах проекта. Метод положительно себя зарекомендовал в моделировании ВХ, что было подтверждено результатами сравнения с моделированием ВХ на базе спутниковых данных. Технологии отбора исходных геомагнитных данных и расчета первой и второй производных подробно описаны в отчете за 2013 г. Отобранные записи представляют собой регулярные временные ряды с шагом 1 месяц.

В данном исследовании проверка метода осуществлялась на примере последних двух всплесков ВУ, которые имели место в 2006 и 2009 гг. в атлантическом и южно-азиатском регионах по причине их изученности в уже опубликованных работах ([5]). В качестве исходных данных рассматривались записи восточной (Y) и вертикальной (Z) компонент вектора магнитного поля, полученные на нескольких обсерваториях в двух рассматриваемых регионах, за период с 1997 по 2011 гг. В атлантическом регионе рассматривались 9 обсерваторий, в южно-азиатском – 6. Отбор обсерваторий проводился по двум критериям: расположение в интересующих регионах и наличие непрерывных рядов наблюдений за период 1997–2011 гг. Карты с указанием мест расположения выбранных обсерваторий приведены на рис. 11.2.

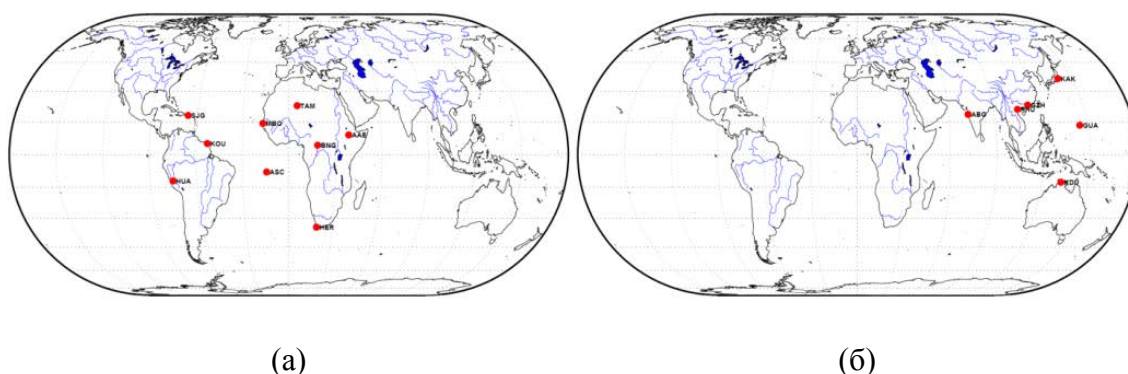


Рисунок 11.2 – Карты расположения обсерваторий в атлантическом (а) и южно-азиатском (б) регионах, отобранных для исследования

ВУ рассчитывалось для каждой обсерватории согласно методу, описанному в отчете за 2013 г. Пример расчета ВУ для компоненты Y проиллюстрирован на рис. 11.3.

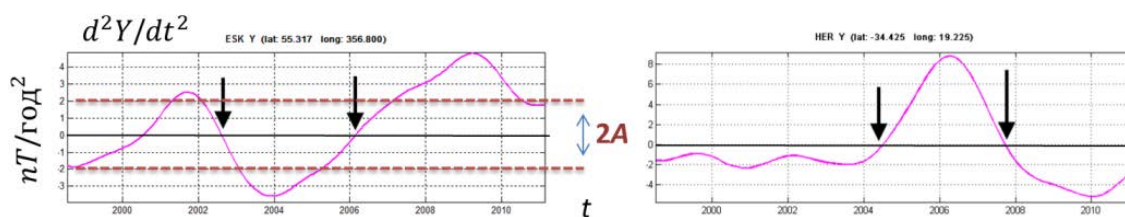


Рисунок 11.3 – Пример расчета ВУ компоненты Y для двух обсерваторий. Стрелками отмечены смены знака ВУ

Для выделения значительных всплесков ВУ рассматривались несколько пороговых значений A (горизонтальная пунктирная линия на рис. 11.3): 2, 3, 4 и 5 нТл/год². Для каждого порогового значения A были обработаны данные всего множества обсерваторий и выделены фрагменты ВУ, превышающие по модулю установленные пороговые значения. Для возможности комплексной оценки полученных результатов рассчитывалась характеристическая функция отдельно для каждого региона, для каждой компоненты Y и Z и для каждого порогового значения A . Каждая характеристическая функция отражает количество обсерваторий в заданном регионе, для которых ВУ по заданной компоненте превышает заданное пороговое значение A за каждый месяц из рассматриваемого временного интервала. Таким образом, в итоге было построено 16 графиков (2 региона, 2 компоненты, 4 пороговых значения A). На рис. 11.4 представлены графики характеристической функции, рассчитанной для компоненты Z по атлантическому региону (рис. 11.4а) и для компоненты Y по южно-азиатскому региону (рис. 11.4б) с учетом всех пороговых значений A .

Как видно из рис. 11.4а, в атлантическом регионе при всех пороговых значениях A наблюдаются ярко выраженные возвышенности характеристической функции обеих полярностей в окрестностях 2006 и 2009 гг. При этом, с увеличением A возвышенности становятся более локализованными. Это легко объяснимо тем обстоятельством, что, согласно «спутниковым» моделям, в атлантическом регионе ВУ за указанные периоды проявляется наиболее интенсивно (см. рис. 11.1).

Для южно-азиатского региона ситуация менее очевидна, что также вполне естественно – интенсивность ВУ на границе ядра и мантии существенно ниже, чем в атлантическом регионе (см. рис. 11.1). Однако чем больше A , тем более отчетливо прослеживаются локальные максимумы характеристической функции обеих полярностей в окрестностях 2006 и 2009 гг. При этом, при наивысшем значении A максимум в окрестности 2009 г. является абсолютным.

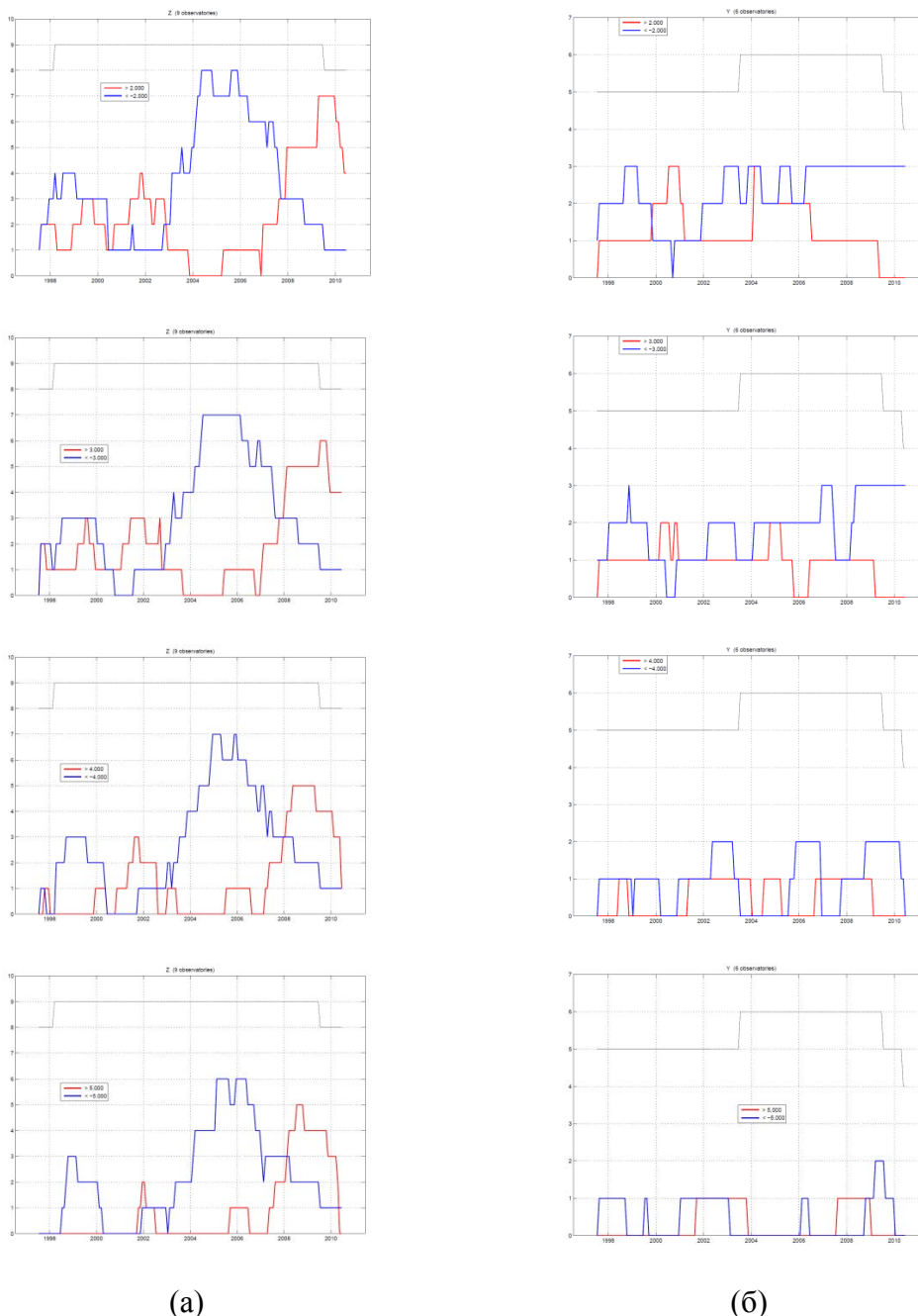


Рисунок 11.4 – Графики характеристической функции, рассчитанной по данным обсерваторий из атлантического (а) и южно-азиатского (б) регионов. Для Атлантики рассматривалась компонента Z, для Южной Азии – компонента Y. Использовались следующие пороговые значения A: 2 (верхние графики), 3, 4 и 5 (нижние графики) нТл/год². На графиках синим цветом обозначено количество обсерваторий за каждый месяц, для которых $d^2Y/dt^2 < -A$ ($d^2Z/dt^2 < -A$), красным – для которых $d^2Y/dt^2 > A$ ($d^2Z/dt^2 > A$)

Итак, полученные результаты демонстрируют эффективность и перспективность предлагаемого метода для распознавания всплесков ВУ исключительно по обсерваторским данным. Данное обстоятельство дает серьезные основания для использования метода в задаче распознавания и анализа всплесков ВУ до 2000 г., когда спутниковые измерения магнитного поля Земли не проводились. Всплески ВУ, наблюдаемые в регистрируемых

геомагнитных данных, являются прямым проявлением динамических процессов в жидком ядре. Подобный подход к анализу динамики векового хода ГМПЗ используется впервые.

11.2. Разработка метода распознавания аномалий на двумерных рядах геофизических данных

В ГЦ РАН разработан и реализован алгоритм Discrete Perfect Sets (DPS) [8, 9], который при соответствующем выборе параметров выделяет области повышенной плотности в многомерном массиве на основе формальной конструкции плотности. Построены новые модификации алгоритма, позволяющие выделять аномалии на двумерных временных рядах и рельефах (рис. 11.5).

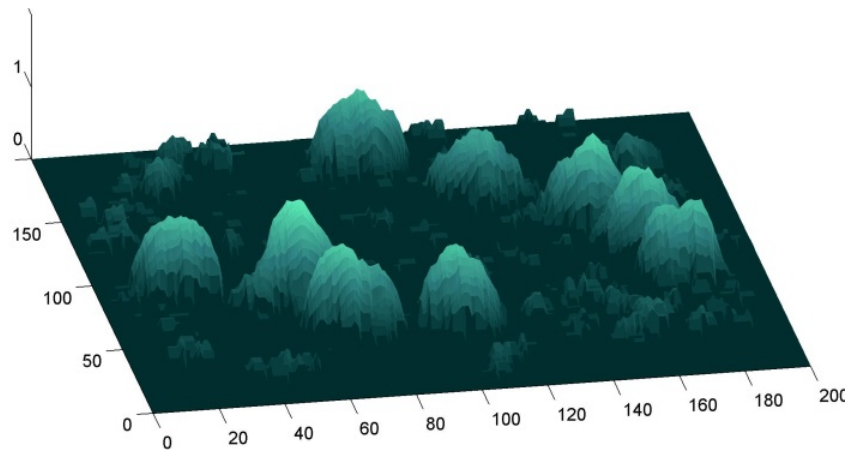


Рисунок 11.5 – Исходный рельеф, синтетические данные

11.2.1. Построение 2D-выпрямлений

Обозначим через $\mathbf{R}_h^+ = \mathbf{R}_{h_1}^+ \times \mathbf{R}_{h_2}^+$ декартово произведение дискретных полуосей $\mathbf{R}_{h_1}^+$ и $\mathbf{R}_{h_2}^+$:

$$\mathbf{R}_{h_1}^+ = \{k_1 h_1, h_1 > 0, k_1 = 1, 2, \dots\}$$

$$\mathbf{R}_{h_2}^+ = \{k_2 h_2, h_2 > 0, k_2 = 1, 2, \dots\}$$

$$\mathbf{R}_h^+ = \{kh = (k_1 h_1, k_2 h_2); h = (h_1, h_2), k = (k_1, k_2)\}$$

Двумерный ряд $y = \{y_k = y(kh) = y(k_1 h_1, k_2 h_2)\}$ предполагается заданным на подмножестве $Y \in \mathbf{R}_h^+$. Введем на \mathbf{R}_h^+ параметр локального обзора $\Delta = (\Delta_1, \Delta_2)$ кратный h , $\Delta \in \mathbf{R}_h^+$. Фрагментом локального обзора назовем следующий участок временного ряда y с центром в $kh = (k_1 h_1, k_2 h_2)$:

$$\Delta^k y = \left\{ y_{k-\frac{\Delta}{h}}, \dots, y_{k+\frac{\Delta}{h}} \right\} \in \mathbf{R}^{\left(\frac{2\Delta_1+1}{h_1} \right) \left(\frac{2\Delta_2+1}{h_2} \right)}.$$

Определение 1: Выпрямлием $\Phi_y(k) = \Phi(\Delta^k y)$ двумерного ряда y назовем неотрицательное отображение, определенное на множестве фрагментов $\{\Delta^k y\}$.

Пример:

1. Длина фрагмента обзора

$$L(\Delta^k y) = \sum_{k-\frac{\Delta}{h} \leq j < k+\frac{\Delta}{h}} \left| \frac{\partial y}{\partial k_1}(j) \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial k_2}(j) \right|.$$

2. Энергия фрагмента обзора

$$E(\Delta^k y) = \sum_{j=k-\frac{\Delta}{h}}^{k+\frac{\Delta}{h}} \left| y_j - \bar{y}_k \right|^2, \text{ где } \bar{y}_k = \frac{\sum_{j=k-\frac{\Delta}{h}}^{k+\frac{\Delta}{h}} y_j}{\left(\frac{2\Delta_1}{h_1} + 1 \right) \left(\frac{2\Delta_2}{h_2} + 1 \right)}.$$

3. Осцилляция фрагмента обзора

$$O(\Delta^k y) = \max_{j=k-\frac{\Delta}{h}}^{k+\frac{\Delta}{h}} y_j - \min_{j=k-\frac{\Delta}{h}}^{k+\frac{\Delta}{h}} y_j.$$

11.2.2. Применение DPS для распознавания аномалий на 2D-выпрямлениях

По выпрямлению Φ_y на множестве Y строится плотность P . Это неотрицательная функция множества и точки:

$$P: 2^Y \times Y \rightarrow \mathbb{R}^+.$$

Если $A \subset Y$, $k \in Y$, то

$$P_A(k) = \sum \Phi_y(\bar{k}), \bar{k} \in A \cap \left[k - \frac{\Delta}{h}, k + \frac{\Delta}{h} \right].$$

В результате применения алгоритма $DPS(Y, P)$ к множеству Y с плотностью P получается подмножество $Anom\Phi_y \in Y$ всех аномальных для ряда y точек на основе выпрямления Φ (рис. 11.6).

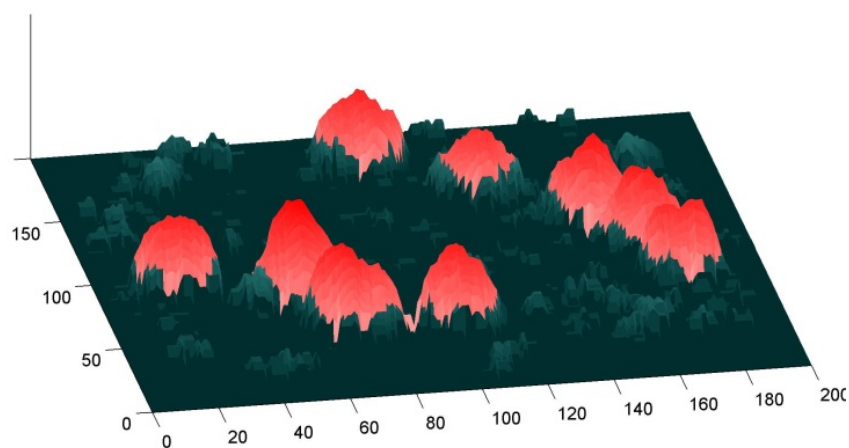


Рисунок 11.6 – $Anom\Phi_y \in Y$

Заключительный этап – разбиение множества аномальных точек $Anom\Phi_y$ на компоненты дискретной связности (рис. 11.7):

$$Anom\Phi_y = (Anom\Phi_y)^1 \vee \dots \vee (Anom\Phi_y)^s$$

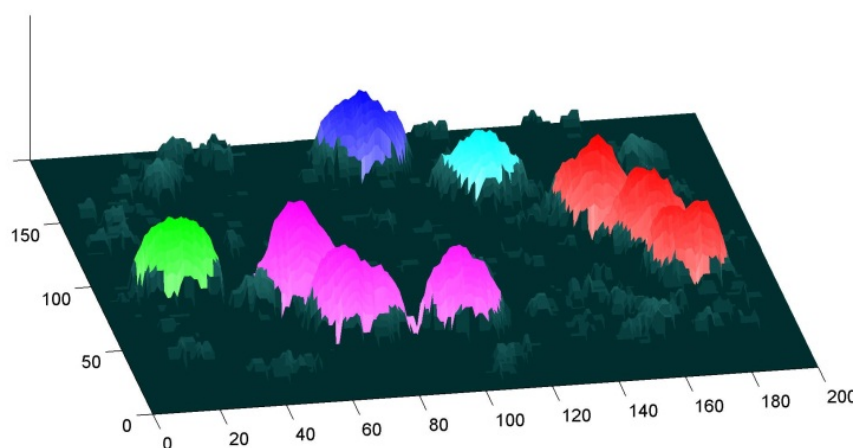


Рисунок 11.7 – $(Anom\Phi_y)^i, i = 1, \dots, s$

Подмножества $(Anom\Phi_y)^i, i = 1, \dots, s$ являются аномалиями двумерного ряда y на основе выпрямления Φ .

11.3. Ввод в эксплуатацию геомагнитной обсерватории стандарта ИНТЕРМАГNET «Климовская» (Архангельская обл.)

С 25 по 29 августа 2014 г. состоялась экспедиция сотрудников ГЦ на магнитную обсерваторию «Климовская», функционирующую на базе геобиостационара «Ротковец» (деревня Поповка, Климовское сельское поселение, Коношский район Архангельской обл.) Института физиологии природных адаптаций Уральского отделения Российской

академии наук (ИФПА УрО РАН). Основной целью поездки являлась установка визирной цели для абсолютных наблюдений и определение ее азимута с помощью геодезических измерений. Визирная цель является неотъемлемым элементом геомагнитной обсерватории. Значение ее азимута используется для привязки горизонтальных отсчетов на деклинометре к абсолютным значениям и последующего определения склонения вектора магнитного поля.

На южной оконечности мыса, вдающегося в оз. Святое, была установлена визирная цель для измерений абсолютного магнитного склонения и наклонения. Визирная цель представляет собой геодезическую марку, закрепленную на стальном винте на торце 8-метровой стальной трубы, установленной вертикально. Труба была вкопана в землю приблизительно на 2 м в специально сделанную ручным шнековым буром скважину и забетонирована. Расположение визирной цели отмечено на плане обсерватории (рис. 11.8а). Расстояние между точкой расположения деклинометра (феррозондового теодолита) в абсолютном павильоне и визирной целью (рис. 11.8б) составляет 177 м. Цель хорошо просматривается из окна абсолютного павильона через зрительную трубу теодолита.

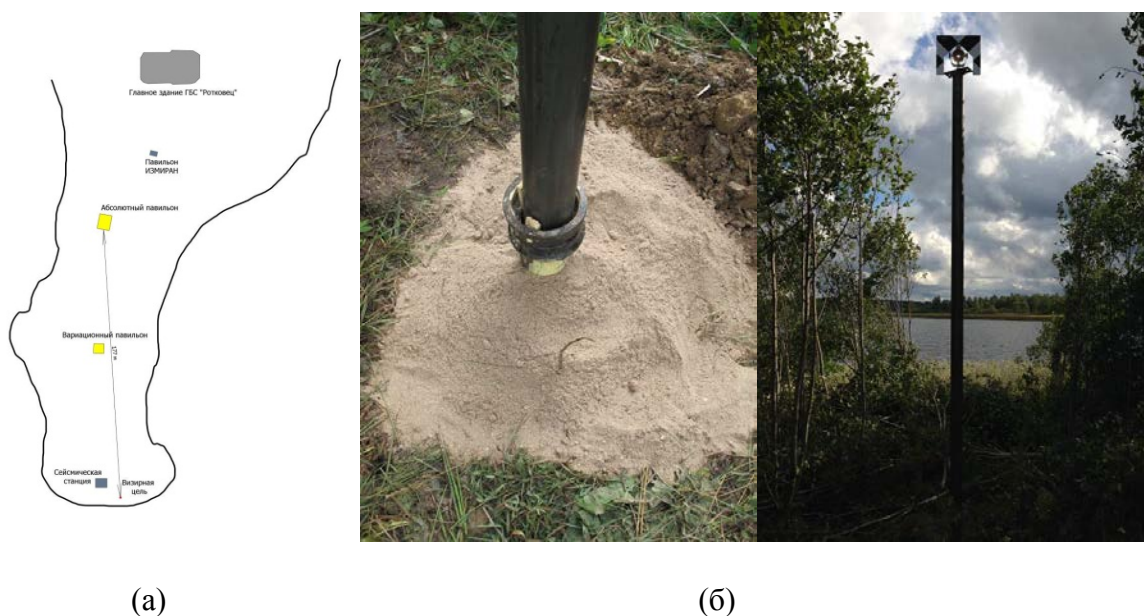


Рисунок 11.8 – (а) – Схема расположения зданий и сооружений магнитной обсерватории «Климовское»; (б) – установленная мира

С помощью ГНСС-приемников и электронного тахеометра (рис. 11.9) были определены координаты визирной цели и постамента в абсолютном павильоне, на котором располагается деклинометр. Был рассчитан геодезический азимут визирной цели. Предварительное значение азимута составляет $174^{\circ} 57' 10''$. Точность определения азимута составляет $\sim 8''$ и удовлетворяет обсерваторским стандартам. При последующей дополнительной обработке ГНСС-измерений будут уточнены координаты визирной цели и постамента, а также будет заново рассчитано значение азимута. Для этого необходимо исполь-

зывать точные эфемериды навигационных спутников GPS, которые были изданы в течение 14 дней после момента измерений. Кроме того, следует учитывать, что в процессе усадки визирная цель может поменять свое положение. Таким образом, в любом случае будут проведены повторные геодезические измерения через 1 год после закладки визирной цели.



Рисунок 11.9 – Работы по определению азимута миры

11.4. Объемы данных, полученных и обработанных за отчетный период

Объем исходных обсерваторских данных ИНТЕРМАГНЕТ, которые использовались в задаче распознавания всплесков ВУ, составил ~120 Мб.

За отчетный период в Российско-украинский центр геомагнитных данных, функционирующий на базе ГЦ РАН, из геомагнитных обсерваторий и станций поступили оперативные данные объемом ~960 Мб. Их объем при хранении в геомагнитной БД составил ~116 Мб.

Кроме того, за отчетный период в центр поступили магнитограммы в отсканированном виде в объеме ~304 Гб.

Итого, общий объем геомагнитных данных, полученных и обработанных за отчетный период, составил ~305,2 Гб.

Список публикаций по результатам проекта

Статьи в журналах

Зелинский Н. Р., Клейменова Н. Г., Козырева О. В., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Соловьев А. А. Алгоритм распознавания геомагнитных пульсаций Pс3 на секундных данных экваториальных обсерваторий сети ИНТЕРМАГНЕТ // Физика Земли. 2014. № 2. С. 91–99. Импакт-факторы: РИНЦ 0,326; WoS 0,494; Scopus 0,376.

Материалы конференций

Soloviev A. A., Bogoutdinov Sh. R., Agayan S. M. New Fuzzy Logic Technique for Modelling Geomagnetic Secular Variation Using Onground Observations // Proc. Int. Conf. «Modern Inform. Technologies in Earth Sciences», Petropavlovsk on Kamchatka, Sept. 8–13, 2014. p. 113–114.

Soloviev A., Agayan S., Bogoutdinov S., Dzeboev B. New methods of geoinformatics for analysing nonregular geophysical data // International Conference on Data Sharing and Integration for Global Sustainability (SciDataCon), 2–5 November 2014, New Delhi (India).

Отчет по результатам проекта

Материалы исследований размещены в отчете «Физические поля Земли: анализ и интерпретация» по Программе ОНЗ РАН № 7 за 2014 год, часть 1, глава 1, параграф 1.4., стр. 46–55.

Список использованных источников

1. Finlay C. C., Dumberry M., Chulliat A., Pais M. A. Short timescale core dynamics: Theory and observations, *Space Sci. Rev.* 2010. Vol. 155, P. 177–218.
2. Olsen N., Manda M. Investigation of a secular variation impulse using satellite data: The 2003 geomagnetic jerk. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. Vol. 255, P. 94–105.
3. Chulliat A., Thébaud E., Hulot G. Core field acceleration pulse as a common cause of the 2003 and 2007 geomagnetic jerks, *Geophys. Res. Lett.* 2010. Vol. 37, L07301, doi: 10.1029/2009GL042019
4. Olsen N., Manda M., Sabaka T. J., Tøffner-Clausen L. CHAOS-2—A geomagnetic field model derived from one decade of continuous satellite data, *Geophys. J. Int.* 2009. Vol. 179, P. 1477–1487.
5. Chulliat A., Maus S. Geomagnetic secular acceleration, jerks, and a localized standing wave at the core surface from 2000 to 2010. *JGR Solid Earth.* 2014. Vol. 119, doi: 10.1002/2013JB010604
6. Агаян С. М., Гвишиани А. Д., Богоутдинов Ш. Р., Каган А. И. Сглаживание временных рядов методами дискретного математического анализа // Российский журнал наук о Земле. 2010. Т. 11. RE40001 (doi: 10.2205/2009ES000436)
7. Гвишиани А. Д., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Каган А. И. Гравитационное сглаживание временных рядов // Тр. ИММ УрО РАН. 2011. Т. 17. № 2. С. 62–70.
8. Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Добровольский М. Н. Об одном алгоритме поиска плотных областей и его геофизических приложениях // Доклады 15-й Всероссийской конференции «Математические методы распознавания образов. ММРО-15». 2011. С. 543–546.
9. 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.

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

Номер гос. регистрации № 0145-2014-0009

Руководитель: директор ГЦ, академик А. Д. Гвишиани

Соруководитель: гл.н.с., д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова

12.1. Методы определения траектории бурения и коррекции с учетом главного, литосферного и внешнего геомагнитного поля

Технология горизонтального бурения скважин требует непрерывного контроля ориентации буровой колонны под землей. Строгое следование заданному направлению необходимо для достижения нефтеносного слоя, а при проводке скважин кустами – для соблюдения условий непересечения стволов скважин. Для измерения зенитного угла и географического азимута применяются скважинные измерительные системы с использованием гироинклинометров или приборов, измеряющих магнитное поле Земли. Несмотря на все измерительные достоинства гироинклинометров, они имеют относительно низкую вибро- и ударопрочность, вследствие чего их затруднительно использовать в буровом забойном оборудовании. Магнитометрическая технология является значительно более экономичной, так как магнитные инклинометры более стабильны и могут использоваться в качестве забойных навигационных систем. Однако при геомагнитном сопровождении бурения в Арктическом регионе возникают проблемы, которых нет в более низких географических широтах. Эти проблемы связаны со строением магнитного поля Земли и мощными спорадическими возмущениями геомагнитного поля во время магнитных бурь. В 2014 г. проводились работы по разработке научных основ и созданию технологического задела в области геомагнитного сопровождения наклонно-направленного бурения скважин в арктической зоне РФ, исследования спорадических геомагнитных вариаций и эволюции внутреннего магнитного поля Земли. Полный спектр работ включал в себя теоретические (изучение локальных аномалий и вариаций геомагнитного поля в арктическом регионе) и прикладные (методические и технологические работы по развертыванию обсерваторий) задачи.

В случае наклонно-направленного или горизонтального бурения забойные двигатели ориентируют в скважине по определенному азимуту, и бурение идет в строго заданном направлении. Постепенно набирается зенитный угол вплоть до 90° , и ствол скважины становится горизонтальным. В скважине измерения производятся компонентным скважинным магнитометром, расположенным в немагнитной капсуле на конце буровой колонны (рис. 12.1). По известным значениям магнитного склонения D и наклона I можно однозначно определить направление на истинный северный полюс (географический азимут) и величину отклонения от вертикали. Скважинный магнитометр входит в систему телеметрического контроля, которая носит название «Measurements While Drilling» (MWD, «Измерения в процессе бурения»), и широко используется при проведении буровых работ и строительстве скважин во всех географических зонах. Методика определения координат с учетом главного магнитного поля Земли, литосферных магнит-

ных аномалий и вариаций внешнего геомагнитного поля известна как «Interpolation In-Field Referencing» (ИФР «Интерполяционная привязка к месту»). Для коррекции телеметрических магнитных данных применяется параллельный мониторинг геомагнитного поля на поверхности Земли с помощью магнитных обсерваторий, развернутых в районе проведения работ, но магнитометрическая аппаратура должна находиться вне техногенных помех. Как правило, обсерватории располагаются на некотором удалении, и для коррекции показаний системы MWD решается задача математической интерполяции данных ближайших обсерваторий.

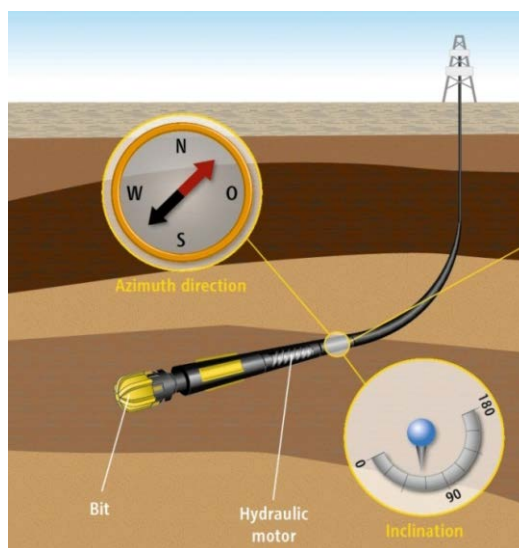


Рисунок 12.1 – Ствол наклонно-направленной скважины, буровой инструмент и измерительные приборы для контроля заданного направления по магнитному склонению и азимуту

Принятые в нефтегазовой промышленности стандарты точности определения параметров геомагнитного поля составляют $0,1^\circ$ для D , $0,05^\circ$ для I и 50 нТл для модуля полного вектора геомагнитного поля F . В Арктике величина I превышает 80° , т.е. силовые линии магнитного поля Земли направлены почти вертикально, а горизонтальная составляющая невелика. Поэтому естественные и техногенные аномалии магнитного поля вносят дополнительную, часто значительно превышающую допустимые значения, погрешность в показания телесистемы MWD. Основной причиной возникновения помех в высоких широтах являются геомагнитные бури, связанные с солнечной активностью. Во время бурь средней интенсивности амплитуда горизонтальных наземных магнитных вариаций от авроральных ионосферных электрических токов достигает 1000 нТл. При экстремальных бурях могут наблюдаться отклонения азимутальной компоненты вектора геомагнитного поля в 4000 и более нТл. В магнитовозмущенные периоды в авроральной зоне амплитуда спорадических вариаций горизонтальной компоненты внешнего геомагнитного поля может быть сравнима по величине с главным геомагнитным полем, по которому осуществляется навигация подземного скважинного рабочего инструмента.

12.2. Геомагнитное поле в Арктическом регионе

На карте, представленной на рис. 12.2, показаны действующие в арктическом регионе магнитные обсерватории, которые входят в мировую сеть обсерваторий реального времени ИНТЕРМАГНЕТ и удовлетворяют высшему стандарту качества геомагнитных измерений полного цикла для промышленных потребителей.

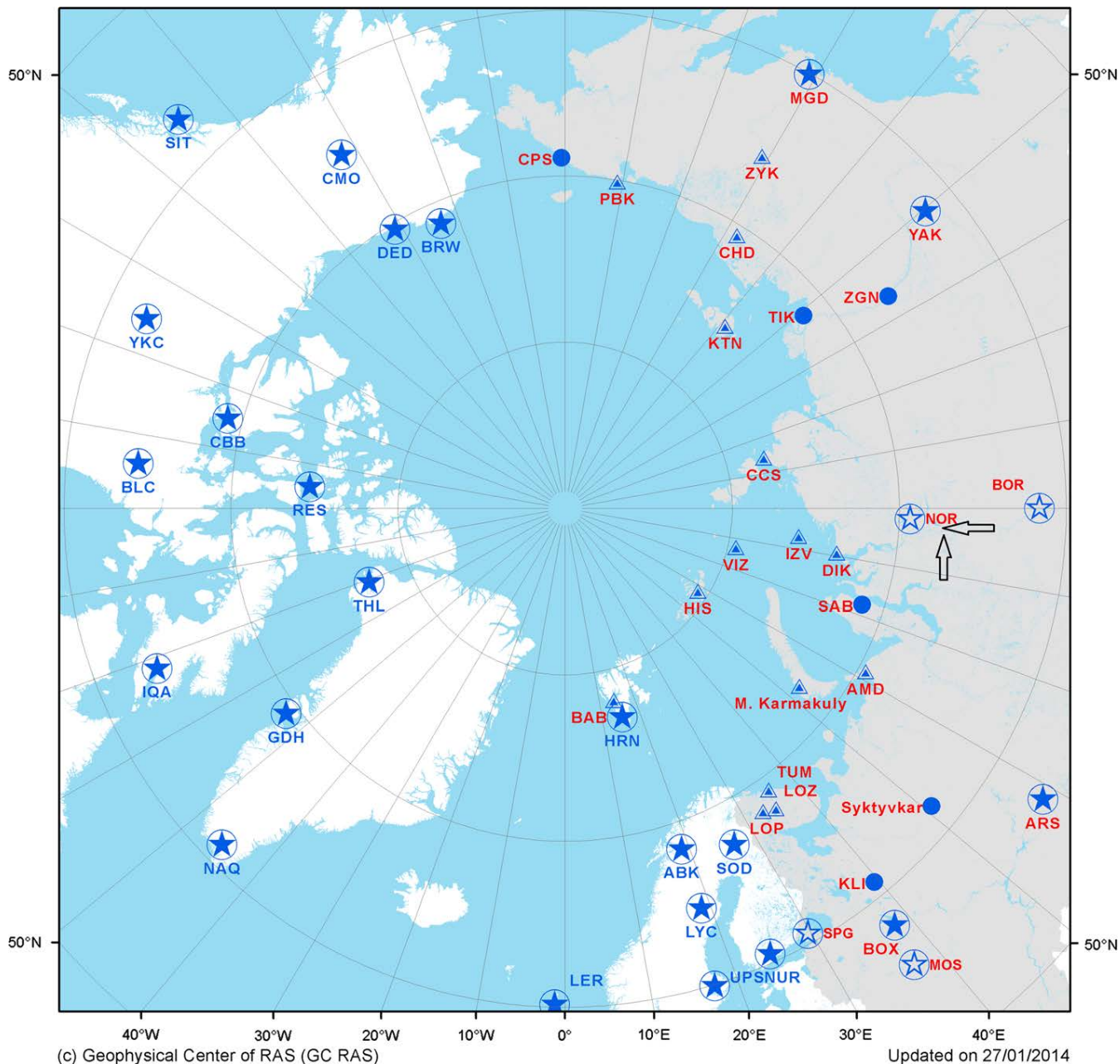


Рисунок 12.2 – Магнитные обсерватории, действующие в Арктическом регионе севернее 60°N. На территории РФ обозначены действующие обсерватории (синие контурные звездочки), в том числе входящие в ИНТЕРМАГНЕТ (синие звездочки), обсерватории, готовящиеся к вводу в эксплуатацию (синие точки) и магнитовариационные станции (треугольники)

В целях расширения российского сегмента ИНТЕРМАГНЕТ в Арктике разработана методическая база и проведены работы по установке аппаратного магнитометрического комплекса стандарта ИНТЕРМАГНЕТ на геофизической обсерватории «Мыс Шмидта» ИКИР ДВО РАН. Вариации магнитного поля регистрируются с помощью: (1) феррозондового компонентного вариометра MAGDAS COLD; магнитометр (оверхаузеровский датчик GSM-19), расположенный в системе двойных колец, регистрирует вариации dH , dD , dZ с частотой 1 Гц, синхронизация к точному времени с помощью встроенного GPS-приемника; и (2) $dIdD$ -магнитометра GSM-19FD GEM Systems, Канада, периодичность измерений 2,5 с. Регистрируются вариации dD , dI и модуль F . Были установлены магнитометры для абсолютных измерений: I -магнитометр (Diflux, DIF) Mag-01H (Bartington Instr., UK) на базе немагнитного теодолита Wild-T1 (Швейцария) для определения магнитного склонения D и наклона I с погрешностью 0,1' и протонный магнитометр ММП-203-М2 для абсолютных измерений модуля вектора магнитной индукции F , точность 0,1 нТл, оверхаузеровский магнитометр POS-1 для измерений F , чувствительность 0,01 нТл, точность 0,5 нТл, измерения с периодичностью до 1 с. Основу для методического обеспечения магнитных измерений составляют требования ИНТЕРМАГНЕТ. Были разработаны алгоритмы и программы для обработки измерений в виде набора скриптов для математического пакета MATLAB, которые обеспечивают: чтение исходных файлов с результатами измерений $dIdD$ GSM-19FD и MAGDAS; визуализацию исходных данных, контроль сбоев таймера; выделение и отбраковку помех в исходных данных; вывод исходных данных в формате MATLAB и текстовом; вычисление среднеминутных значений dF , dD , dI , dZ , вывод в суточные файлы в стандартах IMFv1.23 и IAGA2002; вывод графических файлов и расчет K -индексов геомагнитной активности; сравнение данных dI , dD и MAGDAS. Минутные данные в формате IMF по электронной почте раз в сутки передаются в ГЦ РАН для пополнения базы данных (БД) и представления на сайте центра геомагнитных данных (<http://geomag.gcras.ru>). Организован интерактивный доступ к данным через набор веб-сервисов и визуализация на видео-стенде. Автоматическое обновление БД происходит по мере поступления новых данных. Тестовые непрерывные измерения проводились в течение нескольких месяцев.

Следующая часть работ связана с определением характеристик главного поля. Модели главного поля из-за недоучета вековой вариации могут содержать значительные погрешности. Для построения скорректированных локальных магнитных карт в первую очередь необходимо иметь оценки отклонений реально наблюдаемой вековой вариации от статистической модели и изменение этих отклонений во времени. Для ряда высокоширотных станций проанализирован вековой ход F по модели IGRF и по данным периодических наблюдений абсолютных величин. На рис. 12.3 показан вековой ход на станции Диксон (DIK, 71,1°N, 129°E) и мыс Челюскин (CCS, 77,72°N, 104,28°E) за период с 1940 по 2006 г. Наблюдаемое поле на несколько десятых процента слабее, чем модельное. Разность между ними постепенно увеличивалась и в современную эпоху достигает 300 нТл. За полвека интенсивность поля увеличилась, в среднем, на 2%. Межгодовая изменчивость F по данным измерений и сглаженная кривая имеют медленно меняющуюся гармонику с периодом 50–60 лет, а разность между модельной и измеренной межгодовой изменчивостью – линейный тренд: отрицательный для DIK и положительный для CCS.

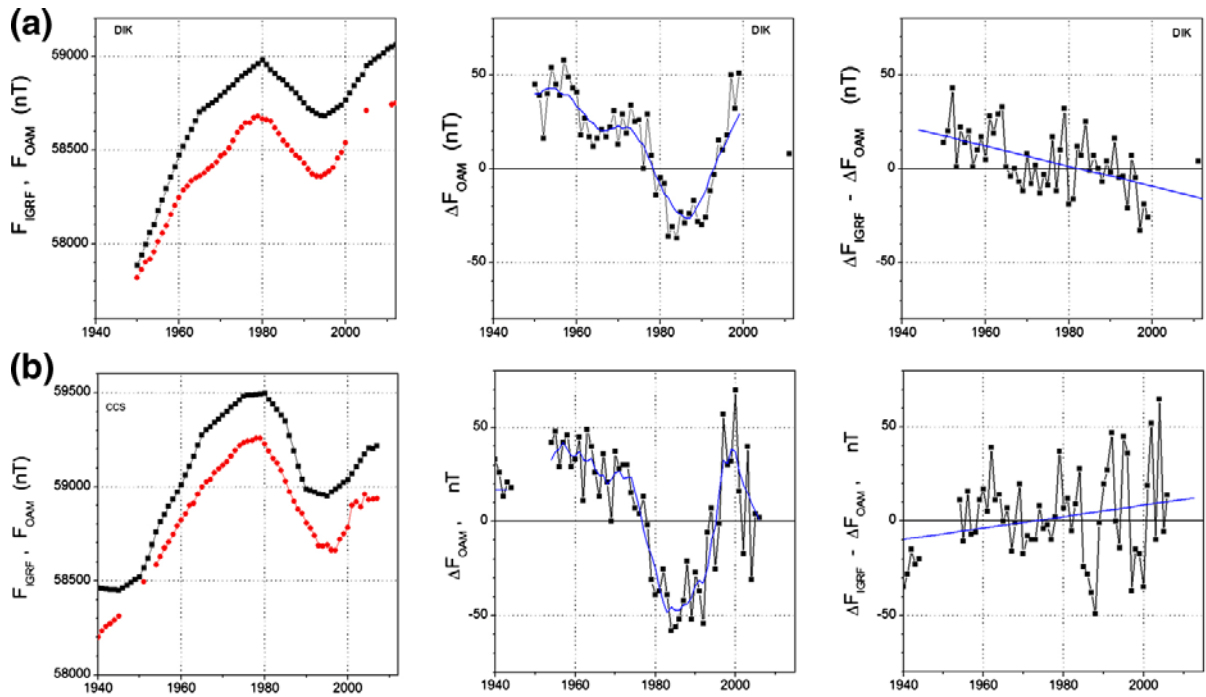


Рисунок 12.3 – Левая колонка: вековая вариация F для станций Диксон (а) и мыс Челюскин (б), рассчитанная по модели IGRF (черные точки), и по данным измерений (красные точки). Средняя колонка: межгодовая изменчивость F по данным измерений и сглаженная по 5 точкам кривая (синяя линия). Правая колонка: разность между модельной и измеренной межгодовой изменчивостью и линейный тренд

Разработаны и протестированы алгоритмы для оценки локальной возмущенности внешнего геомагнитного поля, основанные на методах дискретного математического анализа, описывающих меру вертикальной аномальности на магнитограммах геомагнитных вариаций. Для высокоширотных станций проведено сопоставление мер аномальности с традиционными 3-часовыми традиционными геомагнитными индексами K , которые рассчитываются ретроспективно. Получен коэффициент корреляции $>0,9$, что позволяет перейти к расчету нового индекса активности, основанному на мере аномальности геомагнитного поля – меры аномальности с высоким (вплоть до минутного) временным разрешением и режиме квазиреального времени.

Следующая часть работ связана с определением характеристик внешнего геомагнитного поля для оценки частоты возникновения условий, когда величина геомагнитных возмущений превышает допустимую погрешность точности измерений магнитометров MWD по среднесуточным значениям горизонтальных магнитных элементов I , D и модуля полного вектора поля F на арктических станциях. На рис. 12.4 для обс. Соданкюля (SOD, $67,3^\circ\text{N}$, $26,6^\circ\text{E}$) за два солнечных цикла с 1993 по 2013 гг. показаны гистограммы числа дней в году, когда возмущения внешнего магнитного поля, величины I , D и F , превышали заданные пороговые значения 1° ($0,5^\circ$), $1,5^\circ$ ($0,75^\circ$) и 500 нТл (200 нТл), соответственно. Показано, что на широтах $60\text{--}70^\circ\text{N}$ дни значительных возмущений могут занимать более трети года, особенно в период солнечного максимума.

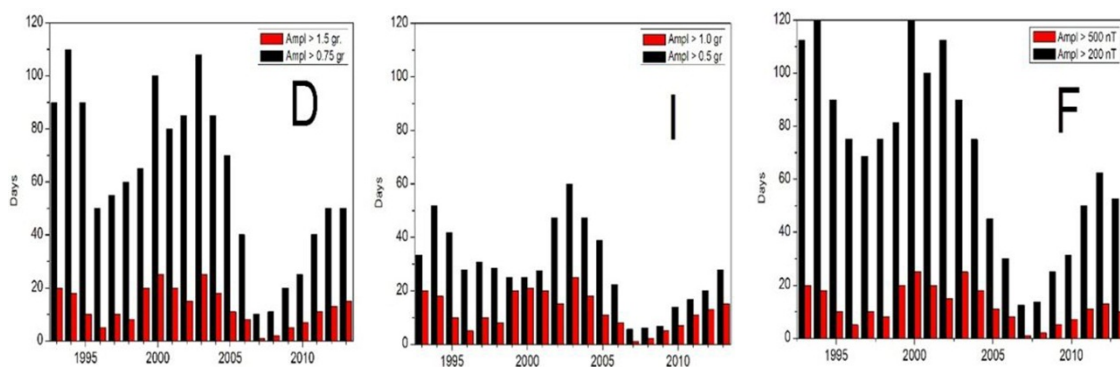


Рисунок 12.4 – Гистограммы, показывающие число дней в году, когда амплитуда среднесуточных отклонений магнитных элементов D , I и интенсивности F от спокойного уровня превышала заданные пороговые значения (обс. SOD, 1993–2013 гг.)

В ходе выполнения работ по проекту получены результаты как прикладного, так и теоретического характера, а именно:

- Для развития российского сегмента геомагнитных обсерваторий и его расширения в арктическую зону разработана методическая база и проведены работы по установке аппаратного магнитометрического комплекса стандарта ИНТЕРМАГNET на наиболее высокоширотной на сегодняшний день магнитной обсерватории «Мыс Шмидта» (69° с.ш., $179,5^{\circ}$ в.д.). Проведены тестовые непрерывные (в течение нескольких месяцев) измерения полного вектора и вариаций геомагнитного поля с организацией канала связи и передачи данных из обсерватории с дискретностью раз в сутки в центр сбора, расположенный в ГЦ РАН, для пополнения базы данных и представления на сайте.
- Вековой ход модуля полного вектора геомагнитного поля F для трех российских высокоширотных станций, полученный по модели главного поля IGRF и по данным наблюдений, имеет различия, достигающие 300 нТл, скорость изменения F имеет период около 50 лет и амплитуду до 100 нТл, разность между модельным и измеренным вековым ускорением знакопеременна и зависит от географического положения. Результат показывает необходимость обсерваторского мониторинга абсолютных значений геомагнитного поля в возможно большем числе точек и локальной коррекции IGRF.
- Аналог локального индекса геомагнитной активности K , рассчитанный как дискретная мера вертикальной аномальности на магнитограммах, имеет коэффициент корреляции с традиционным 3-часовым K -индексом, превышающий 0,9 для всех месяцев года, что позволяет перейти к расчету индекса с высоким (до 1-мин) временным разрешением.
- Оценки частоты возмущений внешнего магнитного поля, при которых величины геомагнитных элементов превышали заданные пороговые значения, показывают, что дни значительных возмущений могут занимать более трети года в период солнечного максимума и на спаде цикла.

Список публикаций по результатам проекта

Статьи в журналах

Гвишиани А. Д., Лукьянова Р. Ю. Геоинформатика и наблюдения магнитного поля Земли: российский сегмент // Физика Земли. 2015. С. 3–20.

Гвишиани А. Д., Лукьянова Р. Ю. Наклонно-направленное бурение скважин в Арктике: найти полюс и не потерять его // Арктические Ведомости / Arctic Herald. № 4, 2014.

Отчет по результатам проекта

Материалы о проведенных исследованиях размещены в итоговом отчете по Программе Президиума РАН 44П «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации» за 2014 год: Книга 3, Раздел II «Нефтегазовые и минеральные ресурсы Арктики и их глубокая переработка», параграф 2.1. «Разработка новых геолого-геофизических и геодинамических моделей строения и эволюция литосферы Арктики и прогноз месторождений полезных ископаемых», подраздел 2.2. «Разработка научных основ новых технологий поиска, разведки и эксплуатации месторождений полезных ископаемых», стр. 123.

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

Номер гос. регистрации № 114101670061 (0145-2014-0010)

Руководитель: директор ГЦ, академик А. Д. Гвишиани

Соруководитель: гл.н.с., д.ф.-м.н. Р. Ю. Лукьянова

13.1. Концепция

Эмпирические модели конвекции основаны на сопоставлении значений ионосферного электрического потенциала с соответствующими значениями солнечного ветра (СВ), межпланетного магнитного поля (ММП) и другими внешними управляющими параметрами. При этом получается, что характеристики продольных токов (ПТ), которые связывают магнитосферу и ионосферу, непосредственно контролируются параметрами СВ и ММП и являются драйверами ионосферных электрических полей, учитываются лишь косвенно. В отличие от предыдущих подходов, в предложенной модели в качестве входных данных и источника потенциала естественным образом используется именно распределение ПТ, причем индивидуальное для каждого полушария. В окончательном виде, после обработки всех данных космической миссии Swarm, статистическая модель ПТ должна быть детально параметризована. В совокупности с соответствующим распределением ионосферной проводимости это дает глобальную картину крупномасштабных электродинамических характеристик ионосферы. Математическое моделирование во многих случаях является более эффективным способом количественного описания электродинамических процессов в ионосфере и прогнозирования развития экстремальных ситуаций. Численные модели прогностического типа предполагают не только адекватное описание физических процессов, но и использование различных способов ассимиляции данных наблюдений. В целом, задача разработки семейства моделей ионосферной электродинамики состоит из двух компонентов: (1) создание статистической модели ПТ по измерениям магнитных вариаций над высокоширотной ионосферой спутниками Swarm, параметризованной по межпланетному магнитному полю, уровню солнечной и геомагнитной активности, величине солнечного зенитного угла, полушарию и (2) создание численной модели глобального распределения ионосферного электрического потенциала (модели конвекции ионосферной плазмы) с учетом электродинамической связи ионосфер противоположных полушарий, где источником возбуждения конвекции является ПТ магнитосферного происхождения из модели (1), а проводимость ионосферы рассчитывается по модели, основанной на измерениях авроральных частиц спутниками DMSP и TIMED. В дальнейшем, семейство моделей может быть расширено за счет создания численной модели расчета 3-мерного распределения электронной концентрации в полярной ионосфере, где конвекция плазмы играет определяющую роль. Для определения эволюции траекторий плазменных трубок в этом случае может использоваться модель (2).

13.2. Магнитное поле, создаваемое продольными токами над ионосферой

Разработана методика численного расчета распределения магнитного поля над ионосферой, которое создается произвольно заданным распределением ПТ. Модель базируется на решении уравнения:

$$\mathbf{V} = \text{rot } \mathbf{A} \text{ при дополнительном условии } \text{div} \mathbf{A} = 0, \quad (13.1)$$

где \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал.

Уравнение (13.1) записывается в сферических координатах θ, φ, r , где θ – геомагнитная коширота, φ – долгота, r – радиус Земли + 120 км и дискретизируется на сетке (θ, φ) с шагом $\Delta\theta, \Delta\varphi$. Электрический ток (в нашем случае ПТ) плотностью j , создающий магнитное поле, направлен нормально к внешней поверхности тонкой ионосферной оболочки. Тогда из $\mathbf{V} = \text{rot} \mathbf{A}(\theta, \varphi) \mathbf{e}_r$ зональная и меридиональная компоненты магнитного поля определяются как

$$B_\varphi = -\frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial \theta} \quad B_\theta = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial A}{\partial \varphi} \quad (13.2)$$

и для узла сетки (i, j)

$$\begin{aligned} (B_\varphi)_1 &= -\frac{A_{ij} - A_{i-1j}}{r \Delta\theta} \\ (B_\varphi)_2 &= -\frac{A_{i+1j} - A_{ij}}{r \Delta\theta} \\ (B_\theta)_3 &= \frac{1}{r \sin \theta_i} \frac{A_{ij} - A_{i, j-1}}{\Delta\varphi} \\ (B_\theta)_4 &= \frac{1}{r \sin \theta_i} \frac{A_{i, j+1} - A_{ij}}{\Delta\varphi} \end{aligned} \quad (13.3)$$

Для единичного контура периметром L :

$$\oint_L \frac{1}{\mu} B_i dl - \frac{4\pi}{c} \int_s j ds = 0 \quad (13.4)$$

Итерационное уравнение для A :

$$\begin{aligned} A_{ij}^{(n+1)} &= A_{ij}^{(n)} - \Delta A_{ij}^{(n, n+1)} \\ \Delta A_{ij}^{(n, n+1)} &= w \frac{f_{ij}(A_{11}^{(n+1)}, \dots, A_{i-1j}^{(n+1)}, A_{ij}^{(n)}, \dots)}{\frac{\partial}{\partial A_{ij}^{(n)}} f_{ij}(A_{11}^{(n+1)}, \dots, A_{i-1j}^{(n+1)}, A_{ij}^{(n)})} \end{aligned} \quad (13.5)$$

где f – левая часть (13.4), w – параметр релаксации, n – номер итерации.

Для решения задачи был разработан алгоритм, реализованный в программном модуле на языке Fortran. Плотность ПТ задавалась в каждом узле сетки согласно статистическим картам, полученным ранее по данным измерений предыдущих космических аппаратов Triad, Magsat, Oersted. На рис. 13.1 представлено распределение плотности ПТ над ионосферой (рис. 13.1а), магнитного потенциала, который создается этим ПТ (рис. 13.1б), зональная V_ϕ (рис. 13.1в) и меридиональная V_θ (рис. 13.1г) компоненты магнитного поля. Для избранных случаев было проведено сравнение рассчитанного распределения магнитного поля с современными измерениями новых спутников Swarm. На рис. 13.2 показано модельное распределение V_ϕ вдоль траектории пролета спутника.

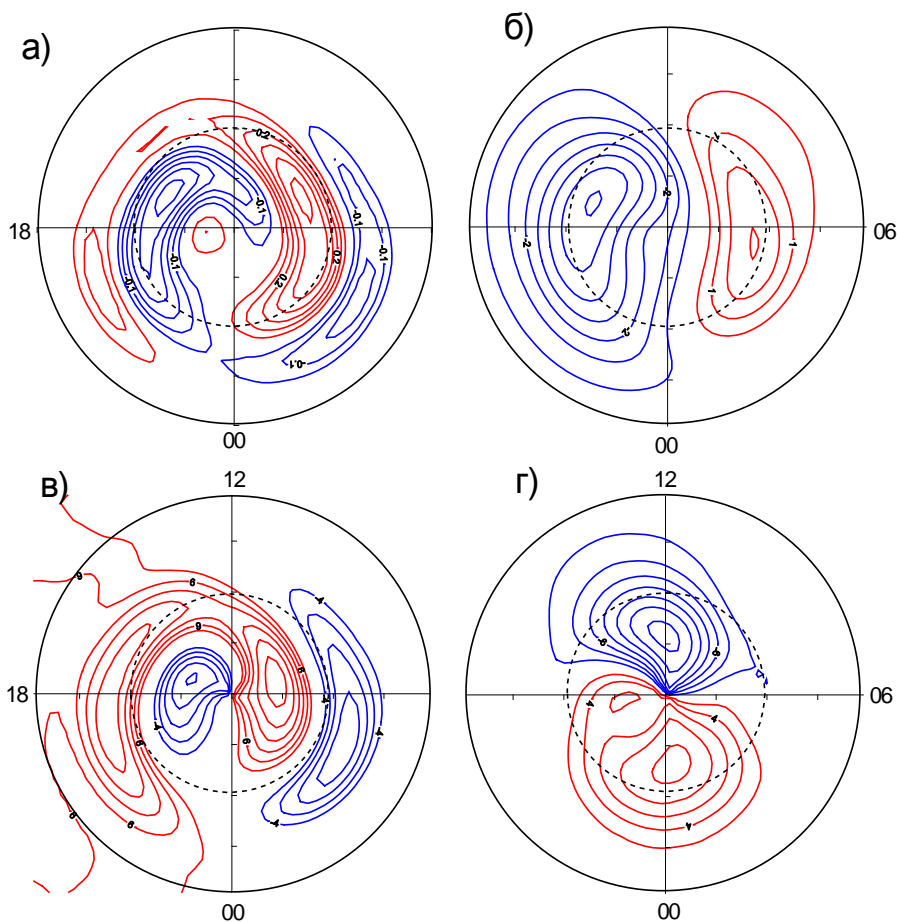


Рисунок 13.1 – Распределение плотности ПТ над ионосферой (а), магнитного потенциала, который создается этим ПТ (б), зональная V_ϕ (в) и меридиональная V_θ (г) компоненты магнитного поля для равноденствия, ММП $B_z = -5$ нТл, $B_y = -5$ нТл. Карты построены в геомагнитных координатах, северное полушарие. Внешняя граница находится на 50° MLat (геомагнитная широта). Красным и синим цветом на диаграмме (а) обозначен ПТ, соответственно втекающий в ионосферу и вытекающий из нее. Красный и синий цвет на диаграммах (б, в, г) соответствуют положительным и отрицательным значениям параметров

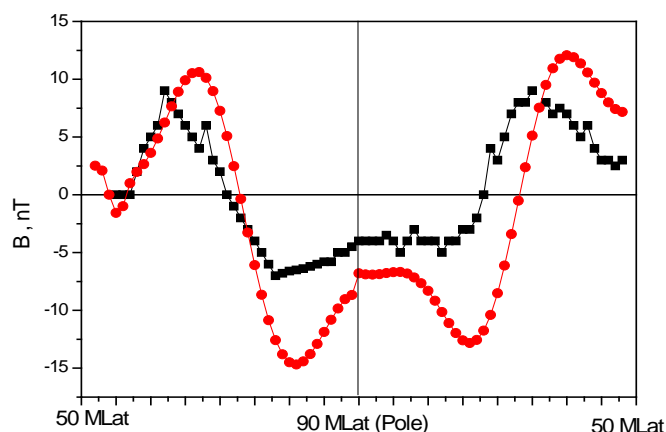


Рисунок 13.2 – Модельное и измеренное распределение V_ϕ вдоль траектории пролета спутника

13.3. База данных по магнитным вариациям, измеряемым группировкой Swarm над ионосферой

Было начато создание базы данных по магнитным вариациям, измеряемым группировкой Swarm в высоких широтах северного и южного полушарий. Разработана структура СУБД и алгоритмы, автоматизирующие привязку данных по магнитному полю к данным по географическим координатам, процесс выделения из спутниковых данных сигнала внутреннего магнитного поля Земли с использованием модели главного поля.

Имеющийся в настоящее время объем магнитных данных приведен в табл. 13.1.

Таблица 13.1

Код	Спутник	Количество файлов	Начало периода	Последние данные	Объем (Мб)
MAGx_CA	SAT_A	339	26.11.2013	18.11.2014	2694
MAGx_CA	SAT_B	337	28.11.2013	18.11.2014	2678
MAGx_CA	SAT_C	319	04.12.2013	05.11.2014	2535
MAGx_HR	SAT_A	341	26.11.2013	18.11.2014	111631
MAGx_HR	SAT_B	337	28.11.2013	18.11.2014	110321
MAGx_HR	SAT_C	319	04.12.2013	05.11.2014	104429
MAGx_LR	SAT_A	539	26.11.2013	18.11.2014	5501
MAGx_LR	SAT_B	536	28.11.2013	18.11.2014	5470
MAGx_LR	SAT_C	511	04.12.2013	05.11.2014	5215

13.4. Модуль расчета двумерного распределения интегральной ионосферной проводимости

Разработаны алгоритмы и программный модуль для расчета двумерного распределения интегральной ионосферной проводимости в зависимости от следующих входных параметров: день года, универсальное время, уровень солнечной и геомагнитной активности. Учитывался вклад солнечного ультрафиолетового излучения и ионизация энергичными авроральными частицами магнитосферного происхождения согласно опубликованным данным наблюдений высыпаний энергичных частиц в ионосфере с помощью спутников DMSP и TIMED и приведенным там параметризациям. Расширение аврорального овала с ростом геомагнитной активности параметризовано согласно статистической модели. Проведен подбор параметров сплайн-интерполяции для сглаживания градиентов проводимости на границах высыпаний частиц и на терминаторе.

13.5. Реализация численного решения краевой задачи для уравнения непрерывности токов, обеспечивающих магнитосферно-ионосферное взаимодействие

Программные модули реализуют задачу непрерывности токов, обеспечивающих ионосферно-магнитосферное взаимодействие

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = j'' \cdot \sin \chi \quad (13.6)$$

где J – интегральные ионосферные токи, j – плотность ПТ, χ – магнитное наклонение.

Проводящая ионосферная оболочка разделена на три области: северная и южная полярные шапки и остальная часть сферы. Двумерное уравнение непрерывности интегрального ионосферного тока в сферических геомагнитных координатах (θ – коширота, φ – долгота) решается для северной, южной и среднеширотной областей отдельно, а соответствующие граничные условия связывают эти три области в единую систему. Внутри северной и южной полярных шапок процесс описывается своим уравнением непрерывности, с присущим данной шапке распределением проводимости и плотности ПТ. Граничные условия отражают неразрывность общей токовой цепи и выравнивание потенциала на границах шапок.

Краевая задача для трех областей ионосферной оболочки ($\alpha=1$ и 2 – северная и южная полярные шапки, $\alpha=3$ – среднеширотная область):

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{J}_1 &= j_1 && \text{при } \theta \leq \theta_1 \\ \operatorname{div} \mathbf{J}_2 &= j_2 && \text{при } \pi - \theta_1 \leq \theta < \pi \\ \operatorname{div} \mathbf{J}_3 &= j_3 && \text{при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_3 \end{aligned} \quad (13.7)$$

$$\begin{aligned}
 U_1(\theta_1, \varphi) &= U_3(\theta_1, \varphi) = U_2(\theta_2, \varphi) \\
 J_1(\theta_1, \varphi) - J_3(\theta_1, \varphi) &= J_2(\theta_2, \varphi) \\
 J_3(\theta_3, \varphi) &= 0
 \end{aligned}$$

где U_α , J_α , j_α – электрический потенциал, интегральный ионосферный ток и ПТ, текущий нормально к внешней границе ионосферной оболочки в соответствующих областях $\alpha=1, 2, 3$. θ_1 (θ_2) – экваториальная граница северной (южной) полярной шапки, θ_1 и θ_3 – границы среднеширотной области.

В ионосфере закон Ома с учетом тензора проводимости записывается:

$$\mathbf{J}_\alpha = \Sigma_\alpha \cdot (-\nabla U_\alpha) \tag{13.8}$$

Уравнения (13.8) для каждой из трех областей дискретизируются на сетке, и задача решается итерационным методом с введением новой переменной Z (τ – параметр релаксации):

$$Z_\alpha^{(n+1)} = (U_\alpha^{(n+1)} - U_\alpha^{(n)}) / \tau^{(n+1)} \tag{13.9}$$

Примеры распределения ионосферного электрического потенциала для различных значений ММП и моментов времени приведены на рис. 13.3.

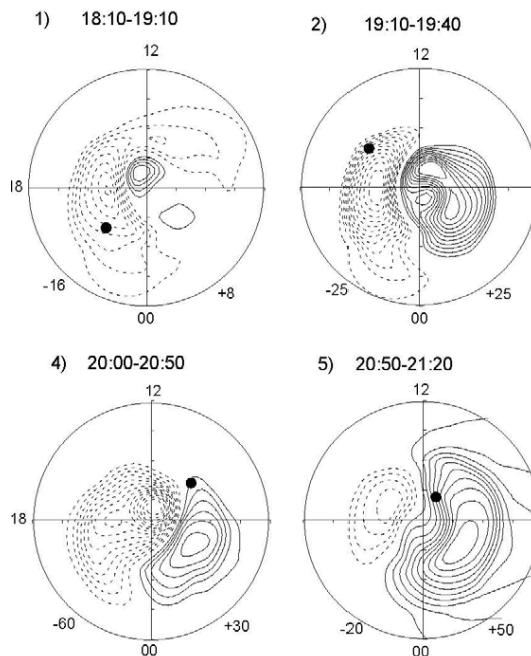


Рисунок 13.3 – Изолинии электрического потенциала (траектории конвекции ионосферной плазмы) для различных значений ММП и моментов времени

13.6. Заключение

Разработана методика и алгоритмы численного расчета распределения магнитного поля над ионосферой, которое создается произвольно заданным распределением электрических токов магнитосферного происхождения, текущих вдоль высокопроводящих силовых линий геомагнитного поля между пограничными слоями магнитосферы и ионосферой (продольных токов – ПТ). Разработана структура базы данных для вариаций магнитного поля, связанных с ПТ по измерениям группировки спутников последнего поколения Swarm и проводится ее наполнение данными по мере их поступления. Разработаны программные модули расчета распределения ионосферной проводимости. Разработаны алгоритмы и программные модули для реализации физико-математической модели распределения электрического потенциала в ионосфере в глобальной постановке, т.е. при учете электродинамической связи между ионосферными оболочками северного и южного полушарий. Модель основана на численном решении краевой задачи для уравнения непрерывности электрических токов, обеспечивающих ионосферно-магнитосферное взаимодействие (интегральные горизонтальные ионосферные токи и ПТ). Постановка граничных условий, отражающих неразрывность общей токовой цепи и выравнивание потенциала на границах шапок, приводит к взаимозависимости распределения электрических полей внутри полярных шапок и влияние обеих шапок на распределение потенциала в среднеширотной области. В качестве источника потенциала задается распределение ПТ на внешней границе ионосферы.

Список публикаций по результатам проекта

Статьи в журналах

Уваров В. М., Лукьянова Р. Ю. Моделирование высокоширотной ионосферы с учетом влияния параметров межпланетной среды // Гелиогеофизические исследования (Научный электронный журнал) № 7, 2014. URL: <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=245>

Свидетельства о государственной регистрации

- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014660976 «sigmaРН». Автор: Лукьянова Р. Ю. Заявка № 2014618636 от 28.08.2014 г. Дата госрегистрации в Реестре программ для ЭВМ 21 октября 2014 г.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661138 «DIFFUR_3REG». Автор: Лукьянова Р. Ю. Заявка № 2014618901 от 02.09.2014 г. Дата госрегистрации в Реестре программ для ЭВМ 23 октября 2014 г.

Отчет по результатам проекта

Материалы исследований размещены в итоговом отчете по Программе 43П Президиума РАН «Фундаментальные проблемы математического моделирования», тема 24, стр. 144–150.

По результатам выполнения проекта в 2014 г. подготовлен, сдан и размещен на сайте ФГАНУ ЦИТиС отчет. Регистрационный номер ИКРБС № 215020970015.

14. Распознавание предвестников геомагнитных бурь на основе спектрально-временного анализа наблюдений магнитных обсерваторий с использованием полигармонических моделей и вычислительных систем сверхвысокой производительности

Номер гос. регистрации № 0145-2014-0011

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

События-предвестники магнитных бурь – Sudden commencement (SC) и магнитные бури (МБ) фиксируются на магнитограммах наблюдений геомагнитного поля (ГМП) и являются процессами, возможно, близкими по своей физической природе.

МБ представляют собой существенно нестационарные колебания ГМП со средней длительностью $\approx 1-2$ суток, с амплитудами до \approx сотен нТл. Сигналы SC появляются в сигналах ГМП за $\approx 5-10$ часов до возникновения МБ в виде коротких импульсов (неск. минут) с малыми амплитудами (десятки нТл). Характерная особенность импульсов SC – наличие крутых передних и задних фронтов-больших значений первых производных.

Согласно используемой здесь феноменологической модели, очевидно, что при отсутствии МБ, сигналы ГМП должны быть низкочастотными, иметь малые амплитуды и быть сосредоточенными в некоторой частотной полосе. Появление SC и последующее возникновение МБ связывается с расширением указанной частотной полосы сигналов ГМП за счет подключения новых мод и возрастанием амплитуд.

Рассмотрим магнитограммы сигналов SC и МБ от обсерватории ААЕ. На рис. 14.1 представлена магнитограмма события SC для координаты ГМП $H_z(T_i)$, время наблюдения в течение суток 12.11.2011, $T = 1$ с, $18000 \text{ с} \leq T_i \leq 26000 \text{ с}$. Для времен $21500 \text{ с} \leq T_i \leq 22000 \text{ с}$ имеют место два импульса SC с амплитудами ≈ 2 нТл; длительность переднего фронта составляет примерно 100 с. Таким образом, первая производная для сигнала SC ГМП составляет величину $\approx 0,020$ нТл/с.

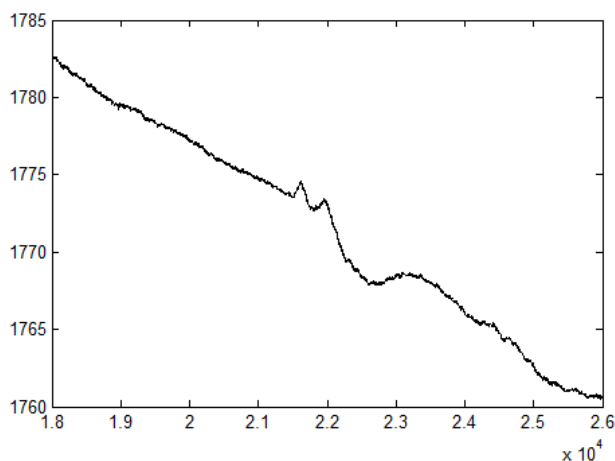


Рисунок 14.1 – Обсерватория ААЕ. Магнитограмма с SC

На рис. 14.2 представлено событие МБ для координаты ГМП $H_x(Ti)$, время наблюдения – в течение месяца, начиная с 01.10.2004, $T = 60$ с, $0 \leq Ti \leq 43199 \cdot 60$ с, начало МБ – $\approx 06.10.2004$, конец МБ – $\approx 12.10.2004$.

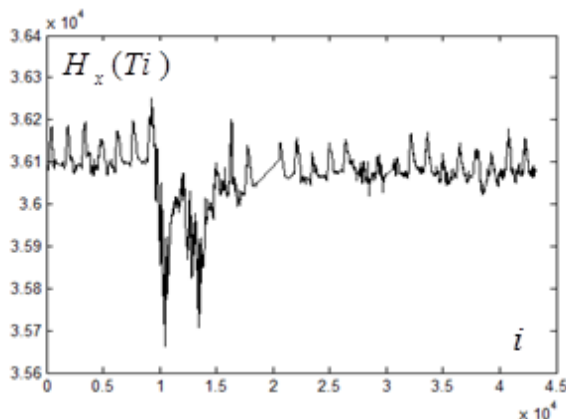


Рисунок 14.2 – Обсерватория ААЕ. Магнитограмма с МБ

Видно, что в данном случае, МБ начинается со скачка вниз, начиная с $Ti_1 \approx 60 \cdot 0,8 \cdot 10^4$ с до момента с $Ti_2 \approx 60 \cdot 1,1 \cdot 10^4$ с. Длительность скачка составляет $\approx 60 \cdot 0,3 \cdot 10^4$ с. Величина скачка равна $\approx (36240 - 35670)$ нТл. Следовательно, максимальное значение первой производной для сигнала МБ ГМП в данном случае принимает значение $\approx 0,003$ нТл/с, что значительно меньше, чем в случае с SC. На рис. 14.3, 14.4 помещены результаты спектрально-временного анализа (СВАН) указанных сигналов SC и МБ с использованием скользящих ДПФ. Приведенные СВАН-диаграммы в виде зависимостей амплитуд $E(k, i)$ от ΔFk и Ti ($\Delta F = 1/NT$ – разрешающая способность ДПФ, N – размерность ДПФ, для SC – $N = 64$, для МБ – $N = 4096$) позволяют составить первоначальное представление о поведении SC и МБ в частотно-временной области.

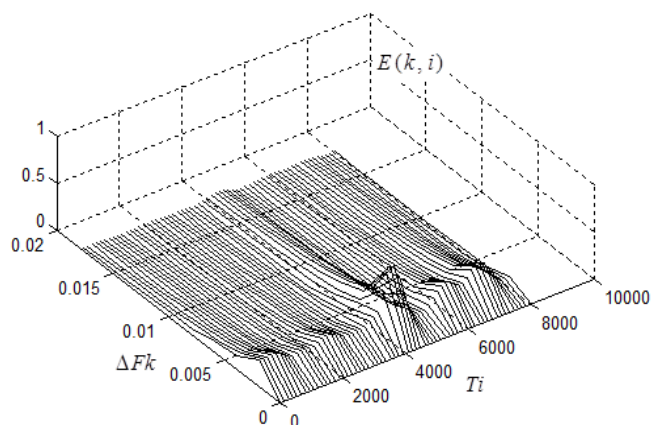


Рисунок 14.3 – Обсерватория ААЕ. СВАН-диаграмма SC

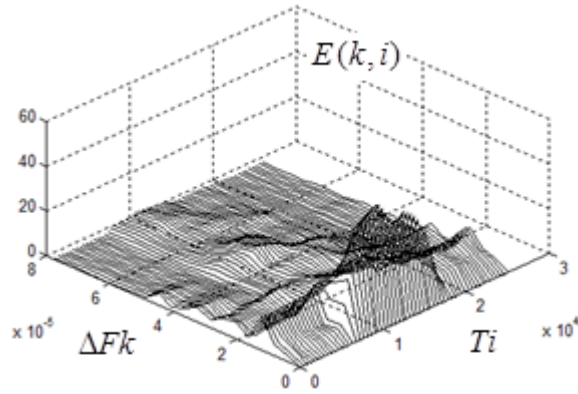


Рисунок 14.4 – Обсерватория ААЕ. СВАН-диаграмма МБ

Видно, что СВАН-диаграммы подтверждают, в общих чертах, правильность предложенной модели.

Общая постановка задачи SC-распознавания базируется на вычислении текущих СВАН-диаграмм сигналов ГМП и реализации их сравнений с заданными референтными СВАН-диаграммами. Недостатки СВАН на основе скользящих ДПФ – малые разрешающие способности по времени и частоте. Полигармонические модели (ПГМ), применяемые для СВАН, позволяют улучшить разрешение по времени и частоте за счет реализации возможно меньших локальных временных интервалов и оптимизации расположения частот для ПГМ.

Алгоритм построения локальных ПГМ базируется на стандартных составляющих: определении модели, наблюдений, функционала и формулировки задачи аппроксимации. ПГМ в дальнейшем будут использоваться для реализации СВАН. Будем полагать, что ПГМ, предназначенная для аппроксимации наблюдений координат вектора напряженности ГМП на локальном интервале, представляется в следующем виде:

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

где a , b – векторы линейных параметров, $\omega^T = (\omega_1, \dots, \omega_L)$ – вектор частотных параметров размерности $(L, 1)$, $\omega \in \Omega_0^L$, Ω_0^L – допустимое множество частотных векторов. Пусть вектор наблюдений имеет вид $Y^T = (y(T \cdot 0), y(T \cdot 1), \dots, y(T \cdot (N-1)))$; формируется функционал:

$$W(a, b, \omega, Y) = \sum_{i=0}^{N-1} (y(Ti) - y_M(a, b, \omega, Ti))^2$$

На первом этапе аппроксимации для $W(a, b, \omega, Y)$ фиксируются нелинейные частотные параметры $\omega = \text{const}$ и находятся частично оптимальные линейные параметры:

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

На основе $a^\circ(\omega, Y)$, $b^\circ(\omega, Y)$ формируется функционал частичной остаточной суммы, зависящий от ω : $W_0(\omega, Y) = W(a^\circ(\omega), b^\circ(\omega), \omega, Y)$. На втором этапе для $W_0(\omega, Y)$ осуществляется оптимизация по $\omega \in \Omega_0^L$. Оцениваются частоты ω° и, с использованием ω° , вычисляются оценки амплитудных параметров a° , b° :

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

Ввиду того, что функционал $W_0(\omega, Y)$ зависит от многих переменных и является многоэкстремальным, его минимизацию целесообразно производить на основе поисковой процедуры нулевого порядка. Для указанной минимизации и получения оценок амплитудных параметров β° реализуется процедура перечисления векторов поисковых частот. Пусть значения координат векторов поисковых частот выбираются на сетке дискретных значений ω_k в диапазоне $(\omega_{\min}, \omega_{\max})$:

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

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

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

Для $L = 2, 3, 4$ системы неравенств для индексов представляются следующим образом:

$$L = 2 \quad 1 \leq k_1 \leq k_f - 1, \quad k_1 + 1 \leq k_2 \leq k_f;$$

$$L = 3 \quad 1 \leq k_1 \leq k_f - 2, \quad k_1 + 1 \leq k_2 \leq k_f - 1, \quad k_2 + 1 \leq k_3 \leq k_f;$$

$$L = 4 \quad 1 \leq k_1 \leq k_f - 3, \quad k_1 + 1 \leq k_2 \leq k_f - 2, \quad k_2 + 1 \leq k_3 \leq k_f - 1, \quad k_3 + 1 \leq k_4 \leq k_f.$$

Введенные индексы удобно объединить в векторы: $k^T = (k_1, k_2, \dots, k_L)$.

Известно, что в общем случае задача перечисления векторов индексов решается на основе известных комбинаторных алгоритмов. Для случая малых значений k_f, L последовательности векторов индексов $k^{s^T} = (k_1^s, k_2^s, \dots, k_L^s)$, $s = 1, \dots, s_f$ достаточно просто могут быть сформированы и пронумерованы на основе вложенных циклов.

При организации поиска по частоте каждому номеру $s = 1, \dots, s_f$ ставится в соответствие вектор индексов k^s и вектор поисковых частот ω^s . Координаты $\omega_{k_1}^s, \omega_{k_2}^s, \dots, \omega_{k_L}^s$ для этого вектора вычисляются по формулам:

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

Отыскание оптимальных частотных и амплитудных параметров ПГМ на локальном интервале с наблюдениями Y сводится к последовательным вычислениям для $s = 1, \dots, s_f$ векторов ω^s и функционалов $W_0(\omega^s, Y)$ и организации перебора:

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

Построение ПГМ на локальном интервале сводится к решению задачи локальной аппроксимации и вычислению оценок оптимальных частот и амплитуд:

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

Сформированной сетке частот ω_k , $k = 1, \dots, k_f$ могут быть поставлены в соответствие амплитуды A_k , $k = 1, \dots, k_f$, где $A_k = (a_{k_l}^{\circ 2} + b_{k_l}^{\circ 2})^{1/2}$, $l = 1, 2, \dots, L$ и $k = k_l^\circ$ – координаты оптимального вектора индексов, для остальных индексов $k \neq k_l^\circ$ будем иметь $A_k = 0$. Результатом спектрального анализа на локальном интервале оказывается введенный одномерный массив амплитуд A_k , $k = 1, \dots, k_f$, где индекс k определяет частоту.

Для большого временного исходного интервала с точками $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$, строится последовательность скользящих локальных интервалов по N точек, расположенных внутри исходного интервала, N_{2j} , N_{1j} – граничные точки локальных интервалов, j – номер локального интервала, $j = 1, \dots, m$. Например, $N_{1j} = dN(j-1)$, $N_{2j} = N_{1j} + N - 1$, $j = 1, \dots, m$, dN – шаг скольжения. Решаются задачи локальной аппроксимации – нахождения ПГМ для последовательности скользящих локальных интервалов. На их основе вычисляются двумерные массивы оптимальных частотных и соответствующих им амплитудных параметров:

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

Результатом СВАН 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. Повышение точности СВАН может быть реализовано на основе взвешенного суммирования.

На основе полученного двумерного массива амплитуд вычисляются локальные функции частотно-временных распределений (ЧВР) $P_j(\omega_k, Ti) = A_{k,j}^2$, $1 \leq k \leq k_f$, $N_{1j} \leq i \leq N_{2j}$, $j = 1, \dots, m$, $P_j(\omega_k, Ti) = 0$, $0 \leq i < N_{1j}$, $N_{2j} < i \leq N_f - 1$ для частотно-временного прямоугольника, которые имеют вполне отчетливый физический смысл. С использованием феноменологической модели задаются референтные ЧВР-функции для спокойных состояний ГМП $P_{0j}(\omega_k, Ti)$. Принятие решений о распознавании SC осуществляется на основе сравнений референтной и локальных ЧВР-функций.

В случае выполнения неравенства $P_{0j}(\omega_k, Ti) < P_j(\omega_k, Ti)$ принимается решение задачи распознавания SC на прямоугольнике $1 \leq k \leq k_f$, $N_{1j} \leq i \leq N_{2j}$. При невыполнении неравенства принимается противоположное решение. Процедура сравнения реализуется на последовательности локальных интервалов $j = 1, \dots, m$. Окончательное решение о SC-распознавании должно производиться на основе обработки результатов процедур принятия решений на последовательности локальных интервалов.

Эффективность алгоритма построения ПГМ зависит от процедур поиска по частотам в допустимых множествах Ω_0^L и $\bar{\Omega}_0^L$, не учитывающих или учитывающих упорядоченность частотных векторов. Очевидно, эффективность алгоритма поиска определяется размером допустимых множеств. Были вычислены размеры для множеств Ω_0^L и $\bar{\Omega}_0^L$ в виде интегралов $V(\Omega_0^L)$, $V(\bar{\Omega}_0^L)$ и коэффициент относительного уменьшения размеров $\varepsilon(L)$:

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

Данный коэффициент для $L = 1, 2, 3, 4$ принимал значения: $\varepsilon(1) = 1$, $\varepsilon(2) = 0,5$, $\varepsilon(3) = 0,166$, $\varepsilon(4) = 0,002$, которые свидетельствовали о соответствующем повышении эффективности поиска по векторам частот вследствие учета упорядоченности.

Эффективность алгоритма СВАН определяется количеством вычислений s_f основного функционала, которое зависит от параметров k_f и L и может быть вычислено как число сочетаний из k_f элементов по L :

$$s_f = \frac{k_f!}{L!(k_f - L)!}.$$

Примем время вычисления функционала, определяемое вектором ω^s , за условную временную единицу (базовую операцию). Тогда, временная сложность исходного последовательного алгоритма с перебором может быть принята равной величине $T_1(k_f, L) = k_f! / (L!(k_f - L)!)$. Переходя к асимптотическим оценкам, после очевидных упрощений для $k_f \gg L$ получим асимптотическую оценку временной сложности в виде функции $T_2(k_f, L) = O(k_f / L)^L$. Алгоритм, на котором основывается предлагаемый СВАН,

имеет экспоненциальную временную сложность. На рис. 14.5 представлены графики зависимостей числа векторов поисковых частот $s_f = C(k_f, L)$ в логарифмическом масштабе для параметров $k_f = 21-40$; параметр L принимал значения: индекс 1 – $L = 3$, 2 – $L = 5$, 3 – $L = 7$, 4 – $L = 9$.

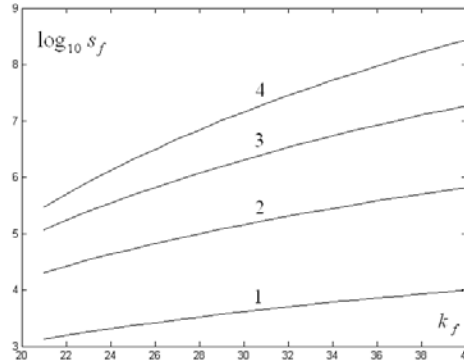


Рисунок 14.5 – Графики зависимостей числа частотных векторов $\log_{10} s_f(k_f, L)$

Графики на рис. 14.5 подтверждают результаты анализа: последовательный алгоритм, на котором основывается предлагаемый СВАН, имеет экспоненциальную временную сложность.

Рассмотрение оценивания погрешностей вычисления параметров ПГМ производится на основе задания вида наблюдений для многочастотного сигнала:

$$y(Ti) = \sum_{l=1}^L (a_{0l} \cos \omega_{0l} Ti + b_{0l} \sin \omega_{0l} Ti) + w(Ti), \quad i = 0, 1, \dots, N-1$$

с известными параметрами $a_{0l}, b_{0l}, \omega_{0l}, l = 1, \dots, L$ и дисперсией шума σ^2 . В качестве ПГМ, естественно, берется функция

$$y_M(a, b, \omega, Ti) = \sum_{l=1}^L (a_l \cos \omega_l Ti + b_l \sin \omega_l Ti).$$

Погрешности оценивания могут быть определены вполне очевидным образом:

$$\delta a_l^\circ = a_l^\circ - a_{0l}, \quad \delta b_l^\circ = b_l^\circ - b_{0l}, \quad \delta \omega_l^\circ = \omega_l^\circ - \omega_{0l}, \quad l = 1, \dots, L.$$

Очевидна их зависимость от параметров исходных наблюдений N, T, σ^2 и шага поиска по частоте. Поскольку ПГМ – это нелинейная функция параметров, и функционал частичной остаточной суммы является многоэкстремальным, то рассматриваемые погрешности ведут себя весьма необычным образом. Так, к примеру, при значительном увеличении σ^2 имеет место скачкообразное нарушение непрерывности функции погрешности частоты из-за перемены местами локальных и глобальных экстремумов.

Для выяснения характера погрешностей целесообразно рассмотреть одночастотный случай с $L=1$ для малых σ^2 , чтобы иметь корректную возможность линеаризации. Приведем формулы для оценок статистических характеристик погрешностей частоты и амплитуд. На основе произведенных достаточно громоздких расчетов были получены формулы для оценки математического ожидания погрешности определения частоты, которая оказалась равной нулю (оценивание без смещений) и оценки дисперсии, величина которой убывает при увеличении N :

$$M[\delta\omega^\circ] = 0, \quad M[\delta^2\omega^\circ] = \sigma^2 \frac{1}{T^2(a_0^2 + b_0^2)} \frac{3(4N^3 + 10N^2 - 100N + 99)}{N^2(N^2 - 12N - 1)^2}.$$

Рассмотрение амплитудных погрешностей, произведенное на основе линеаризации позволило получить формулы для математических ожиданий и дисперсий. Запишем:

$$M[\delta a^\circ] = 0, \quad M[\delta b^\circ] = 0,$$

$$M[\delta^2 a^\circ] = \sigma^2 \frac{b_0^2}{a_0^2 + b_0^2} \frac{36(N-1)^2(4N^3 + 10N^2 - 100N + 99)}{N^2(N^2 + 12N - 1)^2},$$

$$M[\delta^2 b^\circ] = \sigma^2 \frac{a_0^2}{a_0^2 + b_0^2} \frac{36(N-1)^2(4N^3 + 10N^2 - 100N + 99)}{N^2(N^2 + 12N - 1)^2}.$$

Анализ формул для $M[\delta^2 a^\circ]$, $M[\delta^2 b^\circ]$ позволяет сделать вывод, что дисперсии погрешностей оценивания амплитудных параметров уменьшаются с ростом N . Формулы для $L > 1$ могут быть получены обобщением предложенного подхода.

Для уменьшения временной сложности последовательного алгоритма СВАН формируется алгоритм параллельных вычислений. Его структура реализуется с использованием ГРИД-системы и предполагает наличие главного процесса, связанного посредством интернет-каналов с компьютерными кластерами, расположенными в различных географических точках. В компьютерном кластере реализуется функционирование набора процессоров-исполнителей. Главный процессор обеспечивает управление работой параллельного алгоритма. В нем формируются задания для процессоров-исполнителей в виде файлов с исполнительными модулями и входными данными. В свою очередь, процессоры-исполнители передают результаты своей работы в виде файлов на главный процессор. Будем полагать, что: 1) суммарное число процессоров-исполнителей составляет величину n_f ; 2) процессоры-исполнители имеют одинаковые производительности и объемы оперативной памяти.

Число процессоров-исполнителей n_f зависит от объема памяти V_f , требуемого для размещения s_f векторов поисковых частот с размерностями $(L,1)$ в оперативной памяти для главного процесса и V_{f0} -объема оперативной памяти для процессора-исполнителя. Очевидна формула для $V_f = 4 \cdot L \cdot s(k_f, L) / 10^6$ (Мб). Используя V_f , V_{f0} (Мб), можно

сделать приближенную оценку n_f для системы параллельных вычислений в зависимости от параметров k_f, L, V_{f0}

$$n_f = \frac{V_f}{V_{f0}} = \frac{4 \cdot L \cdot s(k_f, L) / 10^6}{V_{f0}}.$$

Параллельный алгоритм для СВАН базируется на разбиении последовательности номеров векторов поисковых частот $s = 1, \dots, s_f$ на n_f равных по длине участков. Вводятся параметр $ds_0 = \text{ent}(s_f / n_f)$ и граничные точки s_{1n}, s_{2n} для последовательности индексов $s = 1, \dots, s_f$, которые могут быть вычислены на основе следующих рекуррентных формул:

$$s_{11} = 1, s_{2n} = s_{1n} + ds_0 - 1, s_{1,n+1} = s_{2n} + 1, n = 1, \dots, n_f - 1, s_{2,n_f} = s_f.$$

Введенное разбиение последовательности номеров векторов индексов на равные участки корректно, поскольку:

- не увеличивает количество вычислений и объем памяти, которые требуются для реализации алгоритма СВАН;
- обеспечивает равномерную загрузку вычислительных узлов за счет разбиения последовательности индексов с номерами $s = 1, \dots, s_f$ на равные участки индексов;
- обеспечивает масштабируемость при увеличении числа вычислительных узлов путем уменьшения длин участков индексов.

Алгоритм параллельных вычислений для СВАН основывается на двухшаговых вычислительных процедурах, в которых:

1. Осуществляются прямые переборы для функционала $W_0(\omega^s, Y)$ по векторам поисковых частот, которые могут быть сведены к переборам по целым индексам $s_{1n} \leq s \leq s_{2n}$. В вычислительных узлах решаются задачи оптимизации функционалов и находятся последовательности значений оценок векторов параметров и функционалов $\omega_n^\circ, \beta_n^\circ, W_{0n}$, $n = 1, \dots, n_f$:

$$s_n^\circ = \arg \left\{ \min_{s_{1n} \leq s \leq s_{2n}} W_0(\omega^s, Y) \right\}, \omega_n^\circ = \omega^{s_n^\circ}, \beta_n^\circ = \beta^\circ(\omega^{s_n^\circ}), W_{0n} = W_0(\omega^{s_n^\circ}, Y), n = 1, \dots, n_f.$$

2. Осуществляются пересылки последовательностей значений оценок $\omega_n^\circ, \beta_n^\circ, W_{0n}$, $n = 1, \dots, n_f$ на главный вычислитель, в котором находятся оптимальные оценки векторов частотных и амплитудных параметров для ПГМ:

$$n^\circ = \arg \left\{ \min_{1 \leq n \leq n_f} W_{0n} \right\}, \omega^\circ = \omega_{n^\circ}^\circ, \beta^\circ = \beta_{n^\circ}^\circ.$$

Вполне очевидно, что предложенный алгоритм параллельных вычислений позволяет снизить временную сложность алгоритма СВАН.

Для исследования алгоритма СВАН был сформирован модельный сигнал $Y(Ti)$:

$$Y(Ti) = E(Ti) \cos(\phi_1(Ti) + \phi_2(Ti)) + w(Ti), \quad i = 0, 1, \dots, N_f - 1.$$

Амплитудные и фазовые модуляционные функции представлялись следующим образом:

$$\phi_1(Ti) = 2\pi f_0 Ti + \phi_0, \quad \phi_2(Ti) = \beta(Ti)^2 / 2, \quad E(Ti) = E_0 \exp(-\alpha(Ti - N_0 T)^2).$$

Случайные нормально-распределенные числа $w(Ti)$ с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 имитировали действие шумов в наблюдениях. Параметры модели принимали значения – $T = 60$ с, $E_0 = 1,0$, $f_0 = 0,2 \cdot 10^{-3}$ Гц ($T_0 = 1 / f_0 = 5 \cdot 10^3$ с), $\phi_0 = 0,2$, $\beta = 0,75 \cdot 10^{-8}$ Гц/с, $\alpha = 1 \cdot 10^{-8}$ с⁻², $N_0 = 350$. Частота сигнала изменялась по линейному, амплитуда – по гауссовскому закону. Данный сигнал предназначался для имитации сигналов СС и МБ и проверки предложенного алгоритма СВАН в рамках вычислительного эксперимента и тестирования работы СВАН-алгоритма в ГРИД-системе при реализации параллельных вычислений. Локальный интервал принимался состоящим из $N = 128$ точек; в среднем, на локальных интервалах умещалось $\approx 1,5$ периода исходного сигнала. Параметр скольжения выбирался равным $dN = N / 4 = 32$, при этом число локальных интервалов оказывалось равным $m_f = 21$. Задавались следующие параметры для формирования векторов поисковых частот – $k_f = 21$, $k_f = 21$, число векторов составило величину $s_f = 165$. Назначались границы поискового диапазона по частоте – $f_{\min} = 0,1 \cdot 10^{-3}$ Гц, $f_{\max} = 0,6 \cdot 10^{-3}$ Гц, шаг дискретности по частоте принимал значение $\Delta f = 0,25 \cdot 10^{-4}$ Гц. Для вычислительного эксперимента принималось $n_f = 5$. На рис. 14.6 представлена СВАН-диаграмма распределений амплитуд $A(f, t)$.

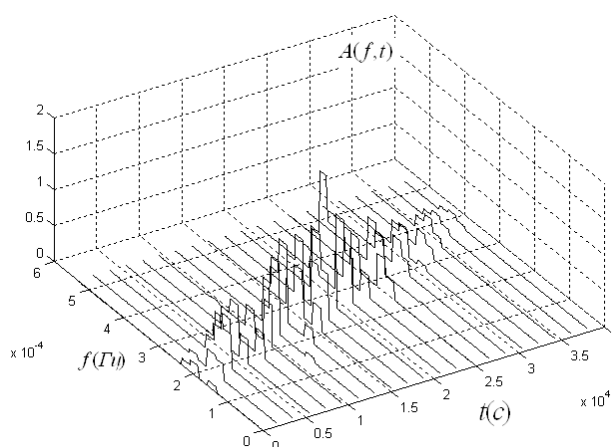


Рисунок 14.6 – СВАН-диаграмма модельного сигнала с амплитудной и частотной модуляцией

На СВАН-диаграмме видно, что при данных параметрах сигнала и алгоритма осуществляется эффективная работа алгоритма СВАН: оценки частоты реализуются в виде линейной функции времени, оценки амплитуды – в виде гауссовой кривой.

Для реализации параллельных вычислений и сверхвысокой вычислительной производительности была сформирована ГРИД-система. На рис. 14.7 представлена двумерная СВАН-диаграмма для рассмотренного сигнала вычисленная на основе ГРИД-системы.

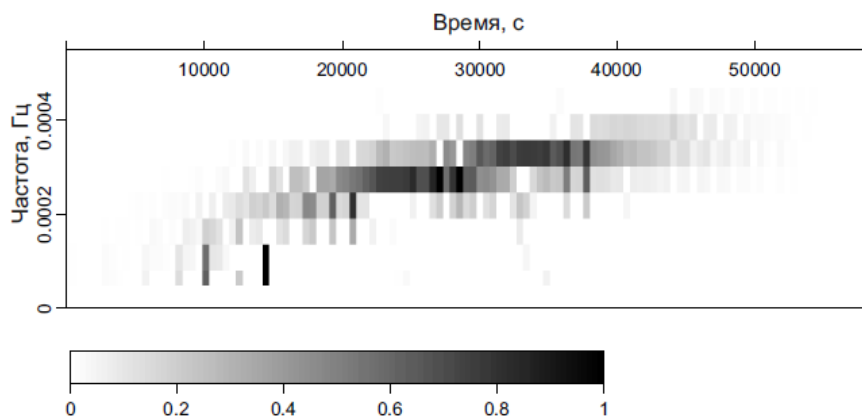


Рисунок 14.7 – СВАН-диаграмма модельного сигнала с амплитудной и частотной модуляцией

Видно, что на основе СВАН-алгоритма, реализованного в данной ГРИД-системе, можно сделать оценки частотной и амплитудной модуляции в модельном сигнале.

Список публикаций по результатам проекта

Статьи в журналах

Алешин И. М., Холодков К. И. Применение распределенных вычислительных систем к расчету апостериорных распределений // Геофизические исследования. 2014. Т.15 № 4. С. 73–80. Импакт-фактор РИНЦ 0,179.

Отчет по результатам проекта

Результаты работы над проектом размещены в полном отчете по Программе Президиума РАН 43П за 2014 г. «Фундаментальные проблемы математического моделирования». Координатор программы академик В. Б. Бетелин, ученый секретарь проф. Н. Н. Смирнов. Тема 25 «Распознавание предвестников геомагнитных бурь на основе спектрально-временного анализа наблюдений магнитных обсерваторий с использованием полигармонических моделей, специальных технологий цифровой обработки одномерных и двумерных рядов данных и вычислительных систем сверхвысокой производительности», стр. 150–154.

15. Оценка геомагнитной активности в режиме реального времени методами дискретного математического анализа

Номер гос. регистрации № 0145-2015-0001

Руководитель: директор ГЦ, академик А. Д. Гвишиани

15.1. Распознавание всплесков геомагнитных пульсаций и глобальная оценка их динамики в режиме реального времени

Самым распространенным видом магнитных колебаний, регистрируемых на земной поверхности, являются дневные геомагнитные пульсации типа Pc3 в полосе частот 20–50 мГц с амплитудой в средних широтах порядка нескольких нТл. Как правило, пульсации Pc3 являются результатом резонансных колебаний силовых линий геомагнитного поля в магнитосфере Земли.

С переходом большинства наземных геомагнитных обсерваторий на цифровую минутную регистрацию данных исследование пульсаций Pc3 ($f = 20\text{--}50$ мГц) по данным этих обсерваторий стало невозможным, поскольку их периоды в среднем составляют порядка 30 с. В ходе модернизации регистрации данных на некоторых магнитных обсерваториях глобальной сети ИНТЕРМАГНЕТ (<http://www.intermagnet.org>) в 2010 году была введена регистрация с частотой дискретизации 1 Гц. Это позволило использовать данные таких наблюдений для изучения пульсаций Pc3. Однако при этом возникла трудность выделения этих колебаний, поскольку их амплитуда значительно меньше более длиннопериодных колебаний, и на исходных данных колебания Pc3 не видны.

Целью исследования является разработка алгоритма автоматического выделения дневных геомагнитных пульсаций Pc3 по данным наземных цифровых наблюдений с частотой дискретизации 1 Гц. Разработан подход на основе использования методов нечеткой логики.

15.2. Входные данные

В работе использовались трехкомпонентные геомагнитные данные $M(t_i) = (M_x(t_i), M_y(t_i), M_z(t_i))$, где t_i менялось от местного магнитного полудня (*MLD*) до магнитной местной полуночи (*MLM*) с шагом $h = |t_i - t_{i-1}| = 1$ с. В этом временном окне могут наблюдаться пульсации Pc3.

Предлагаемый подход был опробован на геомагнитных данных за 5 апреля 2010 года, полученных на десяти обсерваториях французской сети ВСМТ (Bureau Central de Magnétisme Terrestre, <http://www.bcmt.fr>): ААЕ, CLF, DMC, DRV, IPM, LZH, MBO, PAF, PHU, PPT (см. рис. 15.1). Указанные обсерватории также входят и в сеть ИНТЕРМАГНЕТ.

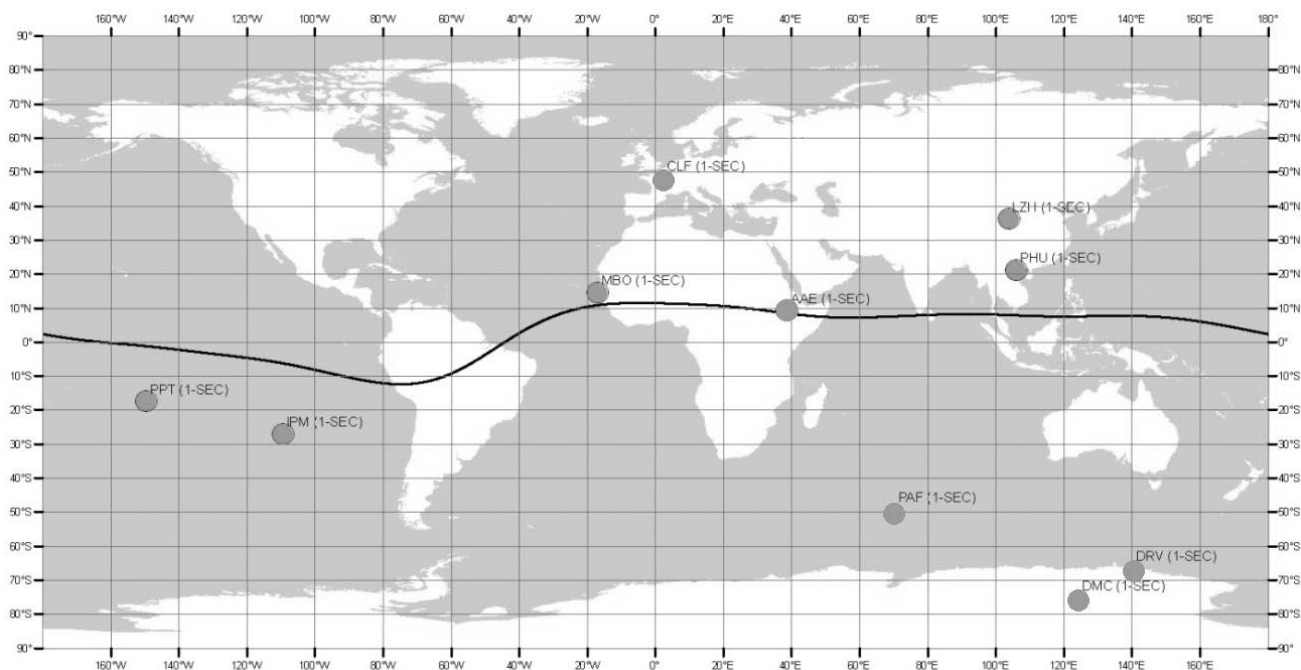


Рисунок 15.1 – Пространственное распределение использовавшихся геомагнитных обсерваторий на карте мира, даны названия обсерваторий. В работе использовались данные за 5 апреля 2010 года. Жирной черной линией показан магнитный экватор

15.3. Использование алгоритма при решении реальной задачи

Алгоритм использовался при анализе 1 с геомагнитных наблюдений на сети разнесенных по долготе приэкваториальных и низкоширотных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ в начальную фазу умеренной магнитной бури (5–7 апреля 2010 г.) нового цикла солнечной активности. Для анализа было выбрано два интервала: внезапное начало бури SC (удар по дневной магнитосфере) и начало большой глобальной суббури, наблюдающейся через полчаса после SC («удар» с ночной стороны магнитосферы). Были исследованы спектральные характеристики геомагнитных пульсаций диапазона Pc3 ($f = 20\text{--}50$ мГц) как на средних, так и на приэкваториальных широтах. Таких исследований в глобальном по долготе масштабе ранее не проводилось. Роль приведенного алгоритма в этих исследованиях – одновременное автоматическое выделение пульсаций Pc3 на нескольких станциях, что позволяет сопоставить пульсации сразу на нескольких станциях (рис. 15.2, 15.3).

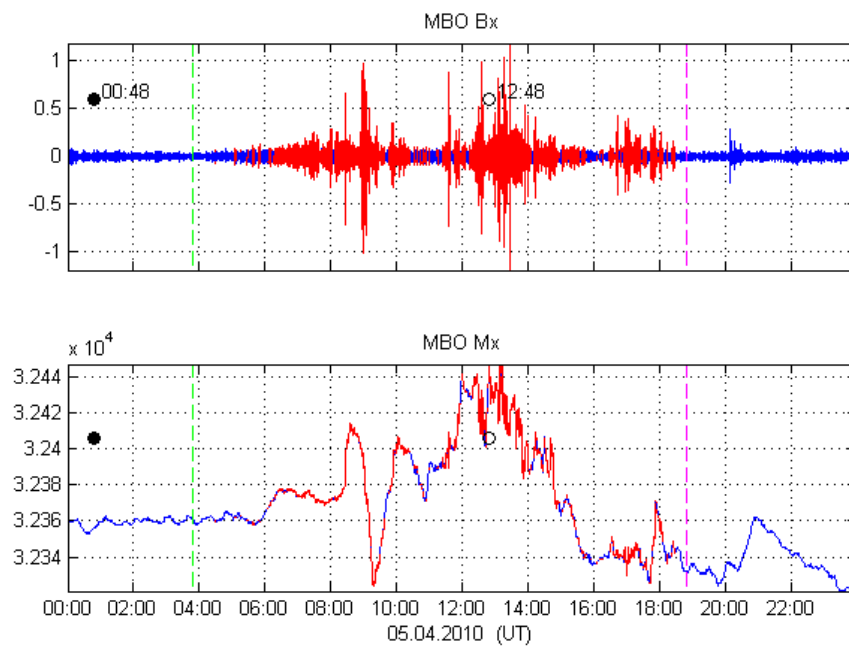


Рисунок 15.2 – Пример выделения единичных пульсаций. Вверху – пульсации на фильтрованной записи B_x , красным цветом отмечены пульсации Pc3. Внизу – пульсации на соответствующей исходной записи M_x , красным цветом отмечены пульсации Pc3

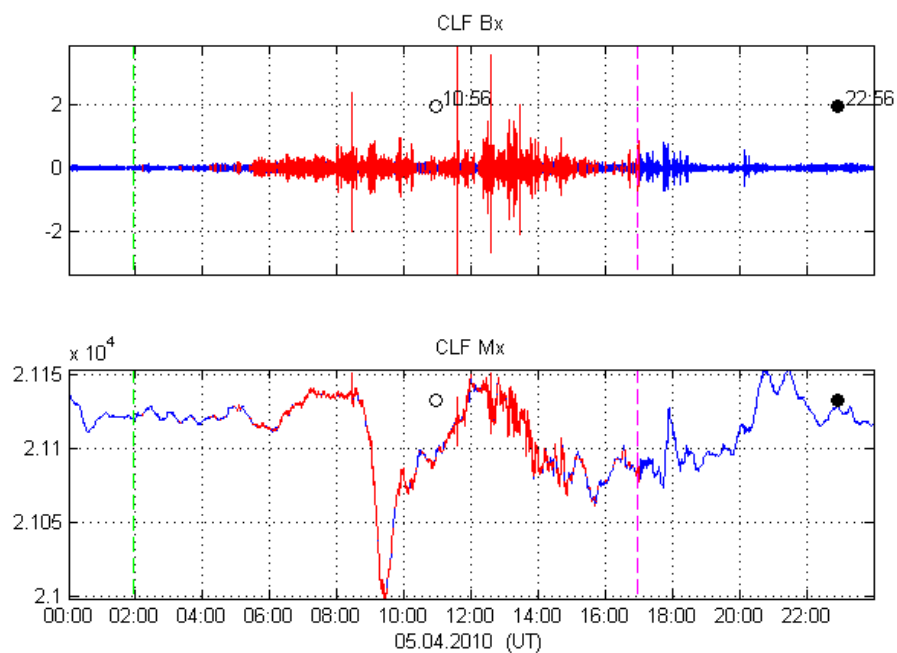


Рисунок 15.3 – Пример результата работы алгоритма (станция CLF 1 с, данные 5 апреля 2010 года). Выделенные продолжительные пульсации Pc3 показаны красным на фильтрованной записи B_x (вверху) и соответствующей исходной магнитограмме M_x (внизу). Светлым кружком показано положение местного магнитного полдня, а черным – положение местной магнитной полуночи

16. Усовершенствование моделей вариаций геомагнитного поля с использованием новых данных обсерваторий российско-украинского сегмента сети ИНТЕРМАГНЕТ

Номер гос. регистрации № 0145-2015-0002

Руководитель: директор ГЦ, академик А. Д. Гвишиани

Из наиболее важных задач, направленных на развитие российско-украинского сегмента мировой сети магнитных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ в 2014 году, важно отметить в первую очередь задачи развертывания новых обсерваторий и обновления и обустройства существующих магнитных обсерваторий на территории России.

Во время отчетного периода на обсерватории «Климовская» доустановлен полный комплект оборудования стандарта ИНТЕРМАГНЕТ, включающий в себя: феррозондовый магнитометр на немагнитном теодолите, протонный оверхаузеровский скалярный магнитометр, трехкомпонентный феррозондовый векторный магнитометр (вариометр) и систему сбора и передачи магнитных данных. В вариометрическом павильоне обсерватории была смонтирована автоматизированная система отопления. На территории обсерватории установлена визирная цель для абсолютных наблюдений магнитного склонения и наклона.

Были проведены работы по доразвертыванию магнитной обсерватории «Бор». В частности, в октябре 2014 г. были проведены геодезические измерения по определению координат имеющейся на обсерватории визирной цели. Также настроена передача данных с обсерватории в ГЦ РАН через сервер Среднесибирского УГМС.

В 2014 г. произведена отладка оборудования на магнитной обсерватории «Санкт-Петербург», где регулярно выполняются абсолютные наблюдения. Была произведена точная настройка векторного магнитометра, а также отладка системы отопления павильонов.

В настоящее время обсерватория «Санкт-Петербург», как и «Климовская», передает данные в Российско-украинский центр геомагнитных данных во времени, близком к реальному – раз в 10 минут, что представляет существенное значение для мониторинга геомагнитной активности.

В рамках развития российско-украинского сегмента мировой сети магнитных наблюдений ИНТЕРМАГНЕТ начата передача данных из обсерватории «Хабаровск» (IAGA-код КНВ, Хабаровский край) и из украинской обсерватории «Академик Вернадский» (IAGA-код АІА) в Антарктиде. На веб-сайте Центра запущена интерактивная служба для расчета и отображения абсолютных данных и базовых значений в реальном времени.

В рамках дискретного математического анализа (ДМА), созданного в ГЦ РАН нового подхода к анализу и обработке геофизических данных, построены так называемые регрессионные производные дискретных функций, определенных на произвольных, в общем случае нерегулярных, конечных сетках в многомерных евклидовых пространствах. Как показали исследования, кроме удачной основы для сглаживания нерегулярных временных рядов (рис. 16.1), регрессионные производные дискретных функций обладают

свойствами, аналогичными свойствам обычных производных для гладких функций, в частности, тесно связаны с трендами и экстремумами (рис. 16.2).

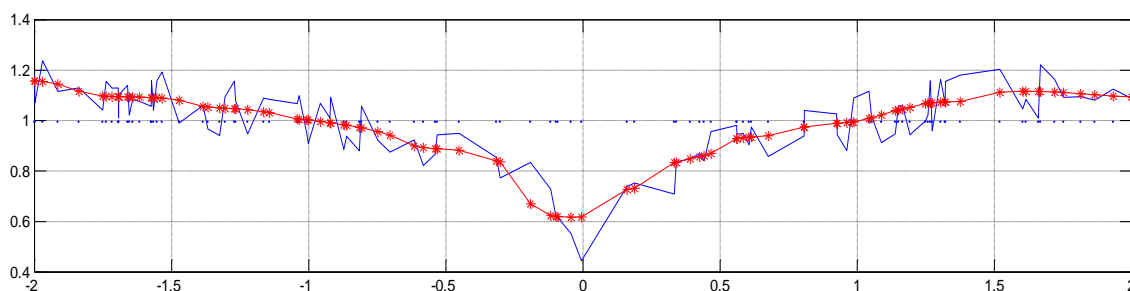
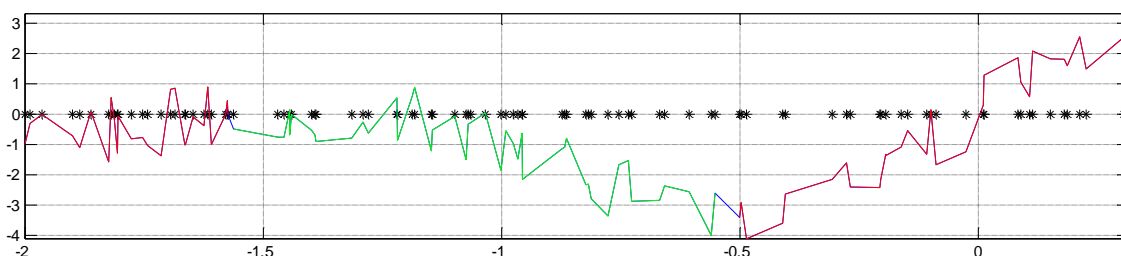


Рисунок 16.1 – Нерегулярное гравитационное сглаживание функции $e^x \sin x + 15\% \text{ noise}$

$$\sin x + \sin 2x + \sin 3x + \sin 4x + 20\% \text{ noise}$$



DMA derivation

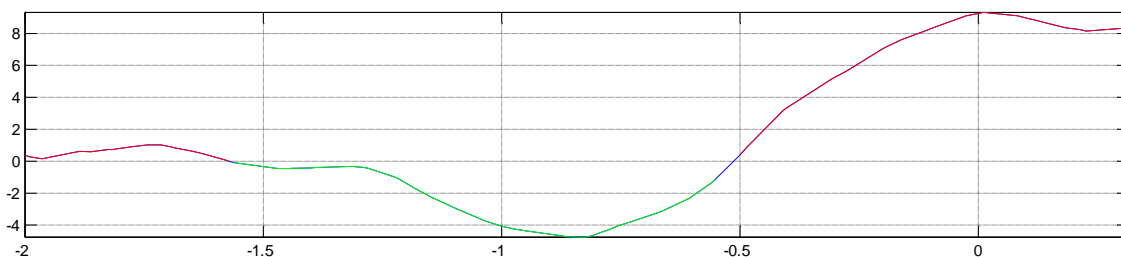


Рисунок 16.2 – Красный цвет – область возрастания функции (производная больше нуля), зеленый цвет – область убывания функции (производная меньше нуля)

Соединение регрессионных производных с регулярным ДМА-сглаживанием позволило распространить ДМА-сглаживания на нерегулярные временные ряды.

Разработано программное обеспечение по приведению данных с геомагнитных обсерваторий российско-украинского сегмента сети ИНТЕРМАГНЕТ и других обсерваторий мира в формат, который будет использоваться для анализа и проведения научных исследований.

Проведены исследования долговременных изменений геомагнитной активности с использованием новых данных расширенной сети магнитных обсерваторий России и Украины, которые входят в российско-украинский сегмент ИНТЕРМАГНЕТ. Показано,

что геомагнитная активность достигла максимума в конце пятидесятих годов двадцатого века, в девятнадцатом цикле солнечной активности, и в дальнейшем наблюдается ее постепенное уменьшение. Наименьшая активность наблюдается на фазе развития 24-го цикла. Сравнение геомагнитной активности с солнечной показало, что резкое уменьшение геомагнитной активности связано с уменьшением величины крупномасштабного магнитного поля Солнца и приближения минимума ~ 200 -летнего цикла солнечной активности. Уменьшение солнечной и геомагнитной активности приведет к изменениям метеорологических процессов в земной атмосфере.

Исследована динамика пространственных и временных изменений возрастных вариаций геомагнитного поля в высоких широтах Земли. В высоких широтах возрастные вариации отражаются в вертикальной компоненте поля. Показано, что возрастная вариация в высоких широтах имеет две компоненты: одна связана с внутренним, вторая – с внешними источниками. Компонента, которая связана с внешними источниками хорошо коррелирует с геомагнитной активностью. Уменьшение солнечной и геомагнитной активности привели к уменьшению абсолютных величин вековых вариаций геомагнитного поля.

Проведено исследование вклада индукционных токов в возрастную вариацию геомагнитного поля по данным украинских геомагнитных обсерваторий. Показано, что величина вклада индукционных токов в возрастную вариацию зависит от геомагнитной активности. В бурные дни амплитуда изменений возрастных вариаций возрастает в 1,5–2 раза.

Проведен расчет силовых и угловых компонент магнитного поля Земли на районы со сложным характером геомагнитного поля путем разработки трехмерных моделей земной коры и вычисления от них вектора аномального магнитного поля.

17. Построение геодинамических моделей глубинного строения регионов природных катастроф

Номер гос. регистрации № 0145-2015-0003
Руководитель: гл.н.с., д.г.-м.н. А. Г. Родников

17.1. О проекте

Проект был направлен на решение фундаментальной проблемы изучения глубинного строения регионов природных катастроф Земли. Работа проводилась в рамках международных программ «InterMargins» и «GeoPRISMS». Район исследования – переходная зона от Евразийского континента к Тихому океану. В 2014 г. выполнен третий этап проекта – завершено построение геодинамических моделей регионов с различными тектоническими режимами Охотского, Японского, Филиппинского и Южно-Китайского морей, характеризующихся активной сейсмичностью, извержениями вулканов и другими природными катаклизмами (рис. 17.1).

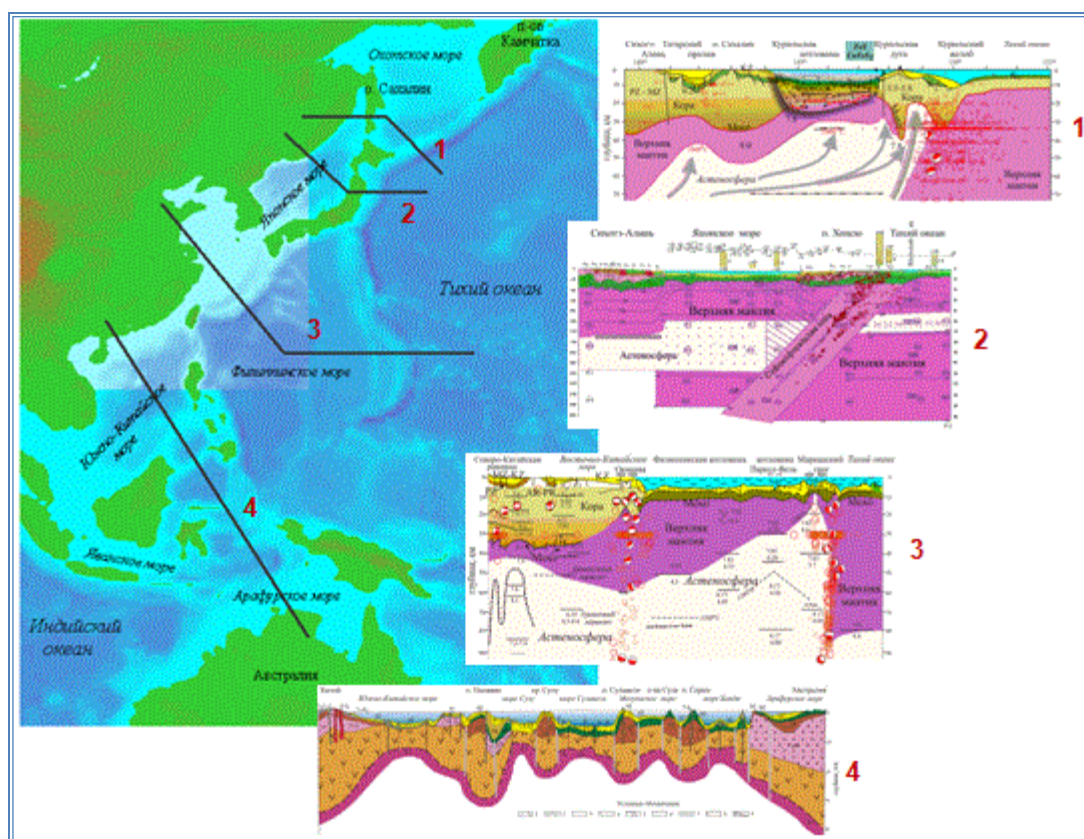


Рисунок 17.1 – Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф переходной зоны от Евразии к Тихому океану

Изучено глубинное строение недр Земли под сейсмоопасными и вулканическими зонами, установлена роль глубинных процессов, протекающих в мантии, в формировании структур земной коры. Под сейсмоопасными зонами установлено аномальное глубинное строение земной коры и верхней мантии, выделены астеносферные диапиры, древние

субдукционные зоны, отмечены зоны повышенного сейсмического риска. Отличительной особенностью глубинного строения переходной зоны от Евразийского континента к Тихому океану является распространение в верхней мантии астеносферного слоя, от которого отходят диапиры аномальной мантии, процессы в которых обуславливают формирование структур земной коры. На поверхности поднятия астеносферы соответствуют рифтовые образования и излияния, в основном, толеитовых магм.

17.2. Результаты исследований

Для региона Охотского моря впервые построена геодинамическая модель глубинного строения региона Нефтегорского землетрясения, происшедшего на Северном Сахалине в 1995 г. Подтверждено расположение древней субдукционной зоны под Сахалином, действующей в позднемиоценовое–палеогеновое время. Вероятно, что очаг Нефтегорского землетрясения непосредственно образовался в связи с активизацией этой древней субдукционной зоны.

Для региона Японского моря установлено, что Японская островная дуга заключена с запада и востока между субдукционными зонами. На востоке под Японскую дугу погружается Тихоокеанская плита, ответственная за землетрясение Тохоку 11 марта 2011 г., с юго-восточной – субдуцирует плита Филиппинского моря, с которой связано землетрясение Канто 1923 г. С запада под Японские острова 2 млн лет назад начала субдуцировать плита Японского моря, с которой связана серия землетрясений вдоль западного побережья о. Хонсю.

Формирование структур региона Филиппинского моря также связано с субдукционными процессами и действиями астеносферных диапиров. Коллизия Тихоокеанской и Филиппинской плит в палеогеновую эпоху привела к формированию Марианской островной дуги и образованию астеносферного слоя под глубоководными котловинами Филиппинского моря и Северо-Китайской плитой. Марианский трог представляет собой междуголовой бассейн, образованный 6 млн лет назад в результате спрединговых процессов. С рифтовыми структурами связаны излияния толеитовых базальтов и интенсивная гидротермальная деятельность.

Регион Южно-Китайского моря расположен между двумя континентами – Евразийским и Австралийским, и двумя океанскими плитами – Тихоокеанской и Индийской. Формирование структур связывают с коллизией Индии и Азии и возникновением мощной Индонезийской субдукционной зоны. Затем очередная структурная перестройка произошла в связи с субдукцией океанской плиты Филиппинского моря под структуры Филиппин. Возникла система островных дуг и задуговых бассейнов, где субдукционные процессы привели к активному вулканизму, сопровождавшемуся излияниями преимущественно щелочных базальтов, и интенсивной сейсмичности в восточной части региона исследования.

Создана междисциплинарная информационная база геолого-геофизических данных по регионам Охотского, Японского, Филиппинского и Южно-Китайского морей. Построение геодинамических моделей глубинного строения регионов природных катастроф

является значительным вкладом в общую программу изучения глубинного строения и геодинамической обстановки районов исследований, необходимую для дальнейшей оценки рисков в той или иной зоне и подготовки действий населения на случай природной катастрофы.

Результаты работ обсуждены на Генеральной ассамблее Европейского союза наук о Земле (Вена, 2013 и 2014 гг.); на XX Международной научной конференции по морской геологии (Москва, 2013 г.); Всероссийской конференции «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит» (Владивосток, 2014).

Список публикаций по результатам проекта

Монография

Родников А. Г., Забаринская Л. П., Рашидов В. А. Сергеева Н. А. Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин. М.: Научный мир, 2014. 172 с.

Статьи в журналах

Родников А. Г., Забаринская Л. П., Сергеева Н. А., Нисилевич М. В. Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф переходной зоны Евразия – Тихий океан // Вестник ОНЗ РАН. 2013.

Rodnikov A. G., Sergeyeva N. A., Zabarinskaya L. P. Ancient subduction zone in the Sakhalin Island // Tectonophysics. 2013.

Rodnikov A. G., Sergeyeva N. A., Zabarinskaya L. P. Crustal and mantle structure of the Sea of Okhotsk, Pacific Northwest: A review // Episodes. 2014.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОТРУДНИКОВ ГЦ РАН за 2014 год

МОНОГРАФИИ

- Лушников А. А., Каган А. И.** Математическое моделирование геомедицинских процессов // Здоровье населения России: влияние окружающей среды в условиях изменяющегося климата / Под общ. ред. академика А. И. Григорьева; Российская академия наук. М.: Наука, 2014. 428 с. С.194–217.
- Любовцева Ю. С., Гвишиани А. Д., Макоско А. А., Пятыгина О. О., Воронова Е. В.** Интеллектуальная медицинская геоинформационная система России в условиях изменяющегося климата // Здоровье населения России: влияние окружающей среды в условиях изменяющегося климата / Под общ. ред. академика А. И. Григорьева; Российская академия наук. М.: Наука, 2014. 428 с. С. 325–343.
- Любовцева Ю. С., Каган А. И., Пятыгина О. О., Воронова Е. В.** Оценка медико-демографической и медико-экологической ситуации на территории России // Здоровье населения России: влияние окружающей среды в условиях изменяющегося климата / Под общ. ред. академика А. И. Григорьева; Российская академия наук. М.: Наука, 2014. 428 с. С. 168–193.
- Родников А. Г., Забаринская Л. П., Сергеева Н. А., Рашидов В. А.** Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин. М.: Научный мир, 2014. 172 с.
- Boldyrev S. I., Egorov I. B., **Ishkov V. N.** et al. The impact of Solar activity on the Earth upper atmosphere as inferred from the CORONAS-F scientific experiments // CORONAS-F Space Mission. Springer. 2014. P. 419–456.
- Dobrovolskaya L. P., **Dobrovolsky M. N.**, Dobrovol'skii N. M., Dobrovolsky N. N. On Hyperbolic Zeta Function of Lattices. In: Continuous and Distributed Systems. Solid Mechanics and Its Applications. V. 211. 2014. P. 23–62. doi:10.1007/978-3-319-03146-0_2
- Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Solovyov D. M., **Lebedev S. A.** Satellite Monitoring of Oil Pollution in the Southeastern Baltic Sea // Oil Pollution in the Baltic Sea / Eds. A. G. Kostianoy, O. Yu. Lavrova. Hdb Env Chem. V. 27. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. P. 125-153. doi: 10.1007/698_2013_236
- Kostianoy A. G., **Lebedev S. A.** Three-Dimensional Digital Elevation Model of the Karashor Depression and Altyn Asyr Lake // The Turkmen Lake Altyn Asyr and Water Resources in Turkmenistan / Eds. I. S. Zonn, A. G. Kostianoy. Hdb Env Chem. V. 28. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. P. 177–195. doi: 10.1007/698_2013_238
- Kostianoy A. G., **Lebedev S. A.**, Solovyov D. M. Satellite monitoring of the Caspian Sea, Kara-Bogaz-Gol Bay, Sarykamysh and Altyn Asyr Lakes, and Amu Darya River // The Turkmen Lake Altyn Asyr and Water Resources in Turkmenistan / Eds. I. S. Zonn, A. G. Kostianoy. Hdb Env Chem. V. 28. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. P. 197–231. doi: 10.1007/698_2013_237

СТАТЬИ В ЖУРНАЛАХ И СБОРНИКАХ

- 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. (**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. № 2. P. 176–190.)
- Алешин И. М.,** Холодков К. И. Применение распределенных вычислительных систем к расчету апостериорных распределений // Геофизические исследования. 2014. Т. 15 № 4. С. 73–80.
- Алешин И. М.,** Васильев А. Е., Холодков К. И., Передерин Ф. В. Использование технологий виртуальных частных сетей для организации оперативных систем геофизических наблюдений // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 1. С. 63–69.
- Алешин И. М.,** Алпатов В. В., Васильев А. Е., Бургучев С. С., Холодков К. И., Будников П. А., Молодцов Д. А., Корягин В. Н., Передерин Ф. В. Оперативная служба мониторинга ионосферы по данным станций глобальных навигационных спутниковых систем // Геомагнетизм и аэрномия. 2014. Т. 54. № 4. С. 496–503. (**Aleshin I. M.,** Alpatov V. V., Vasil'ev A. E., Burguchev S. S., Kholodkov K. I., Budnikov P. A., Molodtsov D. A., Koryagin V. N., Perederin F. V. Online service for monitoring the ionosphere based on data from the global navigation satellite system // Geomagnetism and Aeronomy. 2014. Vol. 54, № 4. P. 456–462. doi: 10.1134/S0016793214040094)
- Артюшков Е. В.,** Беляев И. В., Казанин Г. С., Павлов С. П., Чехович П. А., Шкарубо С. И. Механизмы образования сверхглубоких прогибов: Северо-Баренцевская впадина. Перспективы нефтегазоносности // Геология и геофизика. 2014. № 5–6. С. 821–846. (**Artyushkov E. V.,** Belyaev I. V., Kazanin G. S., Pavlov S. P., Chekhovich P. A., Shkarubo S. I. Formation mechanisms of ultradeep sedimentary basins: The North Barents basin. Petroleum potential implications // Russian Geology and Geophysics. 2014. Vol. 55. № 5–6. P. 649–667).
- Артюшков Е. В.,** Чехович П. А. Новейшие поднятия на раннедокембрийских кратонах вследствие метаморфизма с разуплотнением пород в земной коре // Доклады Академии наук. 2014. Т. 458. № 5. С. 567–571. (**Artyushkov E. V.,** Chekhovich P. A. Neotectonic Uplift of Early Precambrian Cratons Caused by Metamorphism with Rock Expansion in the Earth Crust // Doklady Earth Sciences. 2014. Vol. 458, Issue 2. P. 1215–1219. doi: 10.1134/S1028334X14100158)
- Гетманов В. Г., Сидоров Р. В.** Фильтрация 1-секундных наблюдений от векторного и скалярного магнитометров на основе аппроксимационных кусочно-линейных моделей // Геомагнетизм и аэрномия 2014. Т. 54. № 5. С. 670–678. (**Getmanov V. G., Sidorov R. V.** Filtration of one-second observations from vector and scalar magnetometers based on approximation piecewise linear models // Geomagnetism and Aeronomy. 2014. Vol. 54, № 5. P. 625–632. doi:10.1134/S0016793214050053)
- Голубков Г. В., Манжелий М. И., **Лушников А. А.** Радиохимическая физика верхней атмосферы земли // Химическая физика. 2014. Т. 33. № 7. С. 101–108. (**Lushnikov A. A.,** Golubkov G. V., Manzhelii M. I. Radiochemical physics of the upper Earth's atmosphere // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2014. Vol. 8, Issue 4. P. 604–611. doi:10.1134/S1990793114040034)
- Жижин М. Н.,** Крис Э., Пойда А. А., Годунов А. И., Велихов В. Е., Ерохин Г. Н., Алсынбаев К. С., Брыксин В. М. Использование данных ДЗЗ для мониторинга добычи углеводородов // Информационные технологии и вычислительные системы. 2014. № 3. С. 97–111.
- Зелинский Н. Р., Клейменова Н. Г., Козырева О. В., **Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Соловьев А. А.** Алгоритм распознавания геомагнитных пульсаций Pc3 на секундных данных экваториальных обсерваторий сети ИНТЕРМАГНЕТ // Физика Земли. 2014. № 2. С. 91–99. (**Zelinskiy N. R.,** Kleimenova N. G., Kozyreva O. V., **Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R.,**

- Soloviev A. A.** Algorithm for recognizing Pc3 geomagnetic pulsations in 1-s data from INTERMAGNET equatorial observatories // *Izvestia-Physics of the Solid Earth*. 2014. Vol. 50. № 2. P. 240–248).
- Ишков В. Н.** Солнце в августе–сентябре 2013 г. // *Земля и Вселенная*. 2014. № 1. С. 22–24.
- Ишков В. Н.** Солнечные вспышечные суперсобытия: когда они могут происходить и энергетические пределы их реализации // Сборник статей Междисциплинарного коллоквиума «Космические факторы эволюции биосферы и геосферы», Москва, 21–23 мая 2014 г. Ред. В. Н. Обридко. СПб.: ВВН. 2014. С.85–98.
- Камнев Е. Н., **Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Каган А. И., Качур Л. И.** Геодинамическое районирование при проектировании отработки урановых месторождений // *ГИАБ*. 2014. № 6. С. 374–380.
- Костяной А. Г., Гинзбург А. И., **Лебедев С. А.** Климатическая изменчивость гидрометеорологических параметров морей России в 1979–2011 годах // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова*. 2014. № 570. С. 50–87
- Костяной А. Г., Гинзбург А. И., **Лебедев С. А., Шермет Н. А.** Южные моря России // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2014. С. 644–683.
- Лебедев С. А.** Климатические изменения температуры поверхности и уровня Балтийского моря по данным дистанционного зондирования // *Янтарный мост. Журнал региональных исследований*. 2014. № 1(1). С. 78–95. (**Lebedev S. A.** Climatic changes in the surface temperature and the sea level of the Baltic (Research based on remote sensing data) // *Amber Bridge. Journal of Regional Researches*. 2014. № 1(1). P. 68–86.)
- Леонов А. В., Аникушкин М. Н., **Бобков А. Е., Рысь И. В., Козликин М. Б., Шуньков М. В., Деревянко А. П., Батурин Ю. М.** Создание виртуальной 3D-модели денисовой пещеры // *Археология, этнография и антропология Евразии*. 2014. № 3 (59). С. 14–20.
- Логачев Ю. И., Базилевская Г. А., **Ишков В. Н.,** и др. Каталоги солнечных протонных событий и их источников в 20–23 циклах СА // *Космические лучи и солнечная активность*. Ред. И. Я. Либин. Серия космические лучи, Т. 29. М.: МАОК, 2014. С. 156–175.
- Лукьянова Р. Ю.** Исследование Арктики из космоса // *Арктические ведомости*. 2014. № 3(11). С. 68–77.
- Лушников А. А., Загайнов В. А., Любовцева Ю. С., Гвишиани А. Д.** Образование наноаэрозолей в тропосфере под действием космического излучения. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50. № 2. С. 175–184. (**Lushnikov A. A., Zagaynov V. A., Lyubovtseva Yu. S., Gvishiani A. D.** Nanoaerosol Formation in the Troposphere under Action of Cosmic Radiation // *Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. Vol. 50. No. 2. P. 152–159.)
- Любовцева Ю. С., Каган А. И., Пятыгина О. О., Воронова Е. В.** Медико-экологическое районирование территории России // *Геофизические процессы и биосфера*. 2014. Т. 13. № 4. С. 41–59.
- Морозов В. Н., Каган А. И.** К прогнозу локализации залежей углеводородов в центральных и шельфовых районах Камчатки // *Недропользование XXI век*. 2014. №5. С. 48–54.
- Морозов В. Н., Колесников И. Ю., Каган А. И., Пятыгин В. А., Татаринов В. Н., Татаринова Т. А.** Расчет параметров деформирования геологической среды вокруг хранилищ

- РАО по результатам наблюдений смещений земной поверхности спутниковыми системами // ГИАБ. 2014. № 5. С. 239–250. <http://giab-online.ru/catalog/10880>
- Музаев И. Д., Малиев И. Н., **Дзебоев Б. А.** Фрикционная математическая модель динамики гляциального селевого потока // Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра / отв. ред. академик Ю. Г. Леонов, В. Б. Заалишвили.; Центр геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и РСО-А. Владикавказ, 2014. С. 184–186.
- Нечитайленко В. А.** Технологии документирования научного контента. I. Онлайн-журнал // Исследования по геоинформатике. Труды Геофизического центра РАН. 2014. Вып. BS2002. С. 1–8. doi:10.2205/2014BS015
- Пятыгин В. А., Татарин В. Н., Пятыгина О. О.** Экспертная система оценки участков земной коры для размещения экологически опасных отходов // ГИАБ. (деп. рук.) 2014. № 5 С. 355. <http://giab-online.ru/catalog/10880>
- Родников А. Г., Забаринская Л. П., Сергеева Н. А., Нислевич М. В.** Геодинамика активных континентальных окраин переходной зоны Евразийский континент – Тихий океан // Тектоника складчатых областей Евразии: сходство, различие, характерные черты новейшего горообразования, региональные обобщения // Материалы XLVI Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2014. Т. 2. С. 134–139.
- Родников А. Г., Забаринская Л. П., Сергеева Н. А.** Глубинные очаги генерации углеводородов в верхней мантии региона Охотского моря // Глубинная нефть. 2014. Т. 2. № 2. С. 210–219.
- Родников А. Г., Забаринская Л. П., Сергеева Н. А.** Глубинное строение сейсмоопасных регионов Земли (о. Сахалин) // Вестник ОНЗ РАН. 2014. Т. 6, NZ1001, doi:10.2205/2014NZ000121
- Ростовцева Ю. В., **Рыбкина А. И.** Циклостратиграфия понтических отложений Восточного Паратетиса (разрез мыс Железный Рог, Тамань) // Вестник Московского Университета. Серия 4: Геология. 2014. № 4. С. 50–55.
- Рыбкина А. И.,** Ростовцева Ю. В. Астрономическая цикличность верхнемиоценовых отложений Восточного Паратетиса (разрез мыс Железный Рог, Тамань) // Вестник Московского Университета. Серия 4: Геология. 2014. № 5. С. 72–77.
- Савиных В. П., Быков В. Г., Карпик А. П., Молдобеков Б., Побединский Г. Г., Демьянов Г. В., **Кафтан В. И.,** Малкин З. М., Стеблов Г. М. Организация международной комиссии по региональной земной геодезической основе Северо-восточной Евразии // Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле». 2014. № 1/2. С. 16–25. (Savinykh V. P., Bykov V. G., Karpik A. P., Moldobekov B., Pobedinsky G. G., Demianov G. V., **Kaftan V. I.,** Malkin Z. M., Steblou G. M. Organization of the North East Eurasia reference frame // International scientific, technical and industrial electronic journal «Geo Science». 2014. № 1/2. С. 16–25.)
- Сергеева Н. А., Шестопапов И. П., Забаринская Л. П., Нислевич М. В.,** Згуровский М. З., Болдак А. А., Ефремов К. В. Исследование связи активности солнца и сейсмической активности Земли с помощью вейвлет-преобразования // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. Т. 23. № 1. С. 27–34.
- Соловьев А. А., **Гвишиани А. Д.,** Горшков А. И., **Добровольский М. Н.,** Новикова О. В. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и пути развития // Физика Земли. 2014. № 2. С. 3–20. (Soloviev A. A., **Gvishiani A. D.,** Gorshkov A. I.,

- Dobrovolsky M. N., Novikova O. V.** Recognition of earthquake-prone areas: Methodology and analysis of the results // *Izvestiya-Physics of the Solid Earth*. 2014. Vol. 50. № 2. P. 151–168. doi:10.1134/S1069351314020116)
- Сычева Н. К., Щербаков В. П., **Хохлов А. В.** Результаты совместной статистической обработки современных мировых баз данных по палеомагнетизму и палеонапряженности по схеме большого гауссовского процесса // *Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки*. 2014. Т. 156. № 1. С. 111–127.
- Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Колесников И. Ю., Каган А. И., Татаринова Т. А.** Устойчивость геологической среды как основа безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива // *Надежность и безопасность энергетики*. 2014. №1(24). С. 25–29.
- Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Каган А. И.** Моделирование напряжений и направлений фильтраций подземных вод при выборе участков для подземной изоляции радиоактивных отходов // *ГИАБ*. 2014. № 6. С. 243–249.
- Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Колесников И. Ю., Каган А. И.** Кинематический метод геодинамического районирования при проектировании отработки месторождений подземным способом // *Безопасность жизнедеятельности*. 2014. № 7. С. 8–11.
- Татаринов В. Н., Морозов В. Н., Кафтан В. И., Каган А. Я.** Геодинамический мониторинг как основа сохранения биосферы при захоронении радиоактивных отходов // *Международный научно-технический и производственный электронный журнал «Науки о Земле»*. 2014. № 3. С. 47–60. (**Tatarinov V. N., Morozov V. N., Kaftan V. I., Kagan A. Ya.** Geodynamical monitoring as a basis for conservation biosphere at disposal of radioactive waste // *International scientific, technical and industrial electronic journal «Geo Science»*. 2014. № 3. P. 47–60).
- Уваров В. М., **Лукьянова Р. Ю.** Моделирование высокоширотной ионосферы с учетом влияния параметров межпланетной среды // *Гелиогеофизические исследования*. 2014. № 7. С. 108–118.
- Хохлов А. В.** Вековые геомагнитные вариации. методы статистики палеомагнитных направлений в осадочных породах // *Физика Земли*. 2014. № 4. С. 106–111. (**Khokhlov A. V.** The secular geomagnetic variation. Statistical methods for paleomagnetic directions in sediments // *Izvestia-Physics of the Solid Earth*. 2014. Vol. 50. № 4. P. 562–567).
- Шестопалов И. П., [Кужевский Б.М.], [Харин Е.П.]** Корреляция потоков нейтрино с сейсмичностью Земли. Гипотеза о возможности образования нейтрино в период сильных глубинных землетрясений // *Инженерная физика*. 2014. № 1. С. 4–12.
- Шестопалов И. П.,** Баркин Ю. В., Белов С. В. Солнечные пятна и эндогенная активность Земли // *Смирновский сборник – 2014 (научно-литературный альманах)*. Гл. ред. В. И. Старостин. Фонд им. академика В. И. Смирнова. М.: ВИНТИ РАН. 2014. С. 134–148.
- Шутяев В. П., **Лебедев С. А.,** Пармузин Е. И., Захарова Н. Б. Чувствительность оптимального решения задачи вариационного усвоения данных спутниковых наблюдений для модели термодинамики Балтийского моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 4. С. 17–30.
- Щербаков В. П., **Хохлов А. В.,** Сычева Н. К. Сравнение вековых вариаций геомагнитного поля в эпохе брунеса, записанных в вулканических и осадочных породах // *Физика Земли*. 2014. № 2. С. 73–79. (Shcherbakov V. P., **Khokhlov A. V.,** Sycheva N. K. Comparison of the Brunhes epoch

- geomagnetic secular variation recordet in the volcanic and sedimentary rocks // *Izvestia-Physics of the Solid Earth*. 2014. Vol.50. № 2. P. 222–228. doi: 10.1134/S1069351314020098)
- Agayan S. M., Bogoutdinov Sh. R., Dobrovolsky M. N., Kagan A. I.** Weighted gravitational time series smoothing // *Russ. J. Earth Sci.* 2014. Vol. 14, ES3002. doi:10.2205/2014ES000543
- Burmina V. Yu., Avetisyan A. M., **Sergeeva N. A.**, Kazarya K. S. Some Seismicity Regularities of the Caucasus // *Seismic Instruments*. 2014. Vol.50. № 1. P. 192–195. doi: 10.3103/S0747923914030025
- Gvishiani A., Lukianova R., Soloviev A., Khokhlov A.** Survey of Geomagnetic Observations Made in the Northern Sector of Russia and New Methods for Analysing Them // *Surveys in Geophysics*. 2014. Vol. 35. № 5. P. 1123–1154. doi: 10.1007/s10712-014-9297-8
- Kaban M. K.**, Petrunin A. G., Schmeling H., Shahraki M. Effect of Decoupling of Lithospheric Plates on the Observed Geoid // *Surveys in Geophysics*. 2014. Vol. 35, Issue 6, P. 1361–1373. doi: 10.1007/s10712-014-9281-3
- Kaban M. K.**, Yuanda T. R. Density Structure, Isostatic Balance and Tectonic Models of the Central Tien Shan // *Surveys in Geophysics*. 2014. Vol. 35, Issue 6. P. 1375–1391. doi:10.1007/s10712-014-9298-7
- Kozlovsky A., Shalimov S., **Lukianova R.**, Lester M. Ionospheric effects of the missile destruction on December 9, 2009 // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. 2014. Vol.119. № 5. P. 3873–3882. doi:10.1002/2013JA019531
- Lushnikov A. A.** Composition distributions of particles in a gelling mixture // *Physical Review E* 89, 032121. 2014. doi:10.1103/PhysRevE.89.032121
- Lushnikov A. A., Kagan A. I., Lyubovtseva Yu. S., Gvishiani A. D.** Modeling the Evolutionary Demographic Processes for Geomedicine // *Izvestia, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. Vol. 50, Issue 7. P. 661–668. doi: 10.1134/S0001433814040021
- Rodnikov A. G., Sergeyeva N. A., Zabarinskaya L. P.** Crustal and mantle structure of the Sea of Okhotsk, Pacific Northwest: A review // *Episodes. Special Issue*. 2014. Vol. 37. № 4. P. 313–317.
- Shestopalov I. P., and Kharin E.P.** Relationship between solar activity and global seismicity and neutrons of terrestrial origins // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2014. Vol. 14. ES1002, doi: 10.2205/2014ES000536
- 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*. 2014. 11 P. doi:10.1016/j.gsf.2014.07.001
- Tesauro M., **Kaban M. K.**, Mooney W. D., Cloetingh S. (2014, online). NACr14: A 3D model for the crustal structure of the North American Continent // *Tectonophysics*. 2014. Vol. 631. P. 65–86. Special Issue: SI doi:10.1016/j.tecto.2014.04.016
- Usoskin I. G., Hulot G., Gallet Y., Licht A., Thébault E., **Khokhlov A.**, Roth R., Joos F., Kovaltsov G. A. Evidence for distinct modes of solar activity // *Astronomy and Astrophysics*. 2014. Vol. 562. Article number L10. doi:10.1051/0004-6361/201423391
- Vinnik L., Oreshin S., Makeyeva L., Peregoudov D., Kozlovskaya E., Pedersen H., Plomerova J., Achauer U., Kissling E., Sanina I., Jamsen T., Silvennoinen H., Pequegnat C., Hurskainen R., Guiguet R., Hausmann H., Jedlicka P., **Aleshin I.**, Bourova E., Bodvarsson R., Bruckl E., Eken T., Heikkinen P., Houseman G., Johnsen H., Kremenetskaya E., Komminaho K., Munzarova H., Roberts R., Ruzek B., Shomali H., Schweitzer J., Shaumyan A., Vecsey L., Volosov S., Grp P. L. W.

Anisotropic lithosphere under the Fennoscandian shield from P receiver functions and SKS waveforms of the POLENET/LAPNET array // *Tectonophysics*. 2014. Vol. 628. P. 45–54. doi: 10.1016/j.tecto.2014.04.024

Wang L. S., Chen C., **Kaban M. K.**, Du J. S., Liang Q., Thomas M. The use of the A10-022 absolute gravimeter to construct the relative gravimeter calibration baselines in China // *Metrologia*. 2014. Vol. 51. № 3. P. 203–211. doi:10.1088/0026-1394/51/3/203

МАТЕРИАЛЫ И ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ КОНФЕРЕНЦИЙ

Белов С. В., **Шестопапов И. П.** Пространственно-временные закономерности главных проявлений эндогенной активности Земли // Всероссийская конференция с международным участием «Эндогенная активность Земли и биосоциальные процессы» (ГеоБио2014), 5–7 ноября 2014 г., ИФЗ РАН, Москва, Россия.

Гетманов В. Г., Гребенкин М. Д. Применение кусочно- синусоидальных моделей для определения солнечных циклов по среднемесячным числам Вольфа // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Аннотации докладов. Т. 3. М.: НИЯУ МИФИ. 2014. С. 77.

Гетманов В. Г., Дабагян Р. А. Метод оценивания переменных скоростей вращения роторных систем на основе цифровой обработки вибрационных сигналов с использованием локальных аппроксимационных моделей // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Аннотации докладов. Т. 3. М.: НИЯУ МИФИ. 2014. С. 77.

Забаринская Л. П. Геодинамические процессы в переходной зоне Евразийский континент – Тихий океан // Вторая Всероссийская конференция с международным участием «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит» 17–20 сентября 2014 г., Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток. (Постер)

Зелинский Н. Р., Клеменова Н. Г., **Агаян С. М.**, **Лабунцова Л. М.** Применение дискретного математического анализа для изучения геомагнитных пульсаций // «Physics of Aurora Phenomena». Proc. XXXVII Annual Seminar, Apatity, 2014. P. 67–70.

Ишков В. Н. Структура солнечной цикличности: 165 лет достоверным наблюдениям солнечной активности // 9 ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе» 10–14 февраля 2014 г., ИКИ РАН. Сборник тезисов. 2014. С. 16.
http://plasma2014.cosmos.ru/sites/plasma2014.cosmos.ru/files/Abstract_Book_IKI_Plasma-2014.pdf

Ишков В. Н. Солнечные протонные события в шести циклах солнечной активности // 9 ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе» 10–14 февраля 2014 г., ИКИ РАН. Сборник тезисов. 2014. С. 36.

Ишков В. Н. Сценарий солнечной цикличности по достоверному ряду чисел Вольфа // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Аннотация докладов. НИЯУ МИФИ. 2014. Т. 1. С. 80.

Ишков В. Н. Солнечные активные явления и их геоэффективность в текущем 24 солнечном цикле // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Аннотация докладов. НИЯУ МИФИ. 2014. Т. 1. С. 80.

Красноперов Р. И. Картографические веб-сервисы для предоставления геоданных по геологии, геофизике и медицинской географии // 20-я конференция Esri в России и странах СНГ. 22–24 октября 2014 г. Московская область, пансионат «Клязьма» (Устный)

Лебедев С. А. Модель средних высот поверхности Балтийского моря по данным спутниковой альтиметрии // Двенадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы

- дистанционного зондирования Земли из космоса», 10–14 ноября 2014, Москва, Россия. CD Тезисов. ИКИ, Москва, Россия, 2014. 261.
- Лебедев С. А.** Продвижение паводка реки Волга по акватории Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии // Двенадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 10–14 ноября 2014, Москва, Россия. CD Тезисов. ИКИ, Москва, Россия, 2014. 262.
- Лебедев С. А.,** Гинзбург А. И., Костяной А. Г. Межгодовая изменчивость уровня Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии (1993–2012 гг.) // Двенадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 10–14 ноября 2014, Москва, Россия. CD Тезисов. ИКИ, Москва, Россия, 2014. 263.
- Логачев Ю. И., Базилевская Г. А., **Ишков В. Н.** и др. // Опыт создания каталогов солнечных протонных событий. Научная сессия НИЯУИ МИФИ-2014. Аннотация докладов. НИЯУИ МИФИ. 2014. Т. 1. С. 72.
- Лушников А. А.** Наноаэрозоли в атмосфере // Международная конференция памяти проф. Г. В. Розенберга 24–30 октября 2014 Москва, Институт физики атмосферы (Plenary).
- Лушников А. А., Любовцева Ю. С., Каган А. И., Гвишиани А. Д.** Интеллектуальная геомедицинская система для территории РФ // Международная конференция Крым Hi-Tech 24–30 сентября 2014 г. Севастополь. Сборник тезисов на диске.
- Любовцева Ю. С.** Интеллектуальная геомедицинская система для территории РФ // Международная конференция Крым Hi-Tech 24–30 сентября 2014 г. Севастополь пленарный (соавтор).
- Любовцева Ю. С.** Наноаэрозоли в атмосфере // Международная конференция памяти проф. Г. В. Розенберга 24–30 октября 2014 Москва, Институт физики атмосферы пленарный (соавтор)
- Морозов В. Н.** Прогнозирование мест локализации углеводородов // 3-и Кудрявцевские чтения. Москва, ЦГЭ, 20–23 октября. (устный)
- Морозов В. Н., Татарин В. Н., Каган А. И., Колесников И. Ю.** К генезису месторождений нефти и газа в переходных зонах «континент-океан» // 3-е Кудрявцевские чтения – Всероссийская конференция по глубинному генезису нефти. 20–23 октября 2014. Москва, ЦГЭ (устный).
- Нислевич М. В., Сергеева Н. А., Харин Е. П.** Современная мировая система обмена геофизическими данными: прошлый опыт и перспективы на будущее // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Полярная геофизика Ямала: наблюдения, базы данных и информационные системы в практике освоения месторождений нефти и газа, ПОЛАР-2014», Салехард, 14–15 апреля. 2014. С. 25.
- Родников А. Г., Забаринская Л. П., Сергеева Н. А.** Геодинамические процессы в переходной зоне Евразийский континент – Тихий океан // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит: Материалы Второй Всероссийской конференции с международным участием, Владивосток, 17–20 сентября 2014 г. Владивосток: Дальнаука, 2014. С. 113–116.
- Родников А. Г., Забаринская Л. П., Сергеева Н. А., Нислевич М. В.** Геодинамика активных континентальных окраин переходной зоны Евразийский континент – Тихий океан // Тектоника складчатых областей Евразии: сходство, различие, характерные черты новейшего

- горообразования, региональные обобщения // Материалы XLVI Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2014. С. 134–139.
- Рыбкина А. И.** Astronomically-tuned cyclicity in maeotian sediments of the eastern Paratethys // Международная научная конференция "Regional Committee on Neogene Stratigraphy (RCMNS): The Mediterranean Messinian salinity crisis: from geology to geobiology" («Региональный комитет по неогеновой стратиграфии: Средиземноморский Мессинский кризис солёности») 25–28 сентября 2014 г., Турин, Италия. (устный).
- Рыбкина А. И.** Spherical screen and ORBUS software as a new tool in data visualization // Международная научно-практическая конференция "International Conference on Data Sharing and Integration for Global Sustainability (SciDataCon)" («Международная конференция по обмену данными и интеграции для глобальной устойчивости (SciDataCon)») 2–5 ноября 2014 г., Нью-Дели, Индия. (постерный).
- Татаринов В. Н., Морозов В. Н.** Геодинамическая безопасность при строительстве объектов подземной изоляции РАО // Международная научно-техническая конференция «Проблемы экологии» в горном деле» 22–23 апреля 2014 г. Москва: ВНИИПромтехнологии, 2014. С. 34–39.
- Татаринов В. Н.** Гипотеза развития геодинамического процесса в регионе при катастрофическом землетрясении Tohoku-Oki // Вторая Всероссийская конференция с международным участием: «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит» 17–20 сентября 2014 г. Россия, Владивосток. С. 122–124.
- Gvishiani A. D.** Data Center of the Russian-Ukrainian INTERMAGNET Segment (poster) // International Conference "Modern Information Technologies in Earth Sciences". Petropavlovsk on Kamchatka, September 8–13, 2014.
- Gvishiani A. D.** Data Web Mapping Services for Providing Geological, Geophysical and Medical Geography Geodata (poster) // International Conference "Modern Information Technologies in Earth Sciences". Petropavlovsk on Kamchatka, September 8–13, 2014.
- Gvishiani A. D.** The Atlas of the Earth's Magnetic Field 1500–2010 (oral) // International Conference "Modern Information Technologies in Earth Sciences". Petropavlovsk on Kamchatka, September 8–13, 2014.
- Gvishiani A. D., Soloviev A. A., Krasnoperov R. I.** Geomagnetic Data Center of the Russian-Ukrainian INTERMAGNET Segment // Proceedings of the International Conference "Modern Information Technologies in Earth Sciences", Petropavlovsk on Kamchatka, Russia, September 8–13, 2014. P. 23.
- Gvishiani A. D., Soloviev A. A., Rybkina A. I., Pyatygina O. O., Nikiforov O. V.** The Atlas of the Earth's Magnetic Field 1500–2010 // Proceedings of the International Conference "Modern Information Technologies in Earth Sciences", Petropavlovsk on Kamchatka, Russia, September 8–13, 2014. P. 81.
- Ishkov V. N.** Solar flare superevents: When they occur and the energy limits of their realization // Abstracts of Sixth Workshop "Solar Influences on Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere – First SEE/VarSITI kickoff meeting", Nessebar, Bulgaria, May 26–30, 2014. P. 1.
- Ishkov V. N.** Development of the current 24 Solar cycle and the real scenario of the Solar cyclicity // Abstracts of Sixth Workshop "Solar Influences on Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere – First SEE/VarSITI kickoff meeting", Nessebar, Bulgaria, May 26–30, 2014. P. 2.

- Ishkov V. N.** D2.2-0048-14 SCENARIO OF SOLAR CYCLICITY ON RELIABLY WOLF NUMBERS SERIES; D2.2-0050-14 SOLAR PROTON EVENTS IN SIX SOLAR CYCLES ; PSW2-006-14 The Sun in the low solar cycles: evolution, the basic facts and the current 24 cycle development forecast (oral) // Симпозиум COSPAR, Москва, МГУ, 1–10.09.2014.
- Ishkov V. N.** PSW2-006-14 The Sun in the low solar cycles: evolution, the basic facts and the current 24 cycle development forecast // COSPAR abstract. 2014. P. PSW2-006-14.
- Ishkov V. N.** D2.2-0048-14 SCENARIO OF SOLAR CYCLICITY ON RELIABLY WOLF NUMBERS SERIES // COSPAR abstract. 2014. P. D2.2-0048-14.
- Ishkov V. N.** D2.2-0048-14 D2.2-0050-14 SOLAR PROTON EVENTS IN SIX SOLAR CYCLES // COSPAR abstract. 2014. P. D2.2-0050-14.
- Ishkov V. N.** Sun in the epoch “lowered” Solar activity: the comparative analysis of the current 24 Solar cycle and past authentic low cycles // COSPAR-14-PSW.2-0006-14: Solar Cycle 24: a cross-disciplinary view of this Solar Maximum. The 40th COSPAR Scientific Assembly, 2–10 August 2014, Moscow, Russia.
- Kaftan V. N.** Caspian Sea Level and Cosmo-Geophysical Processes: Satellite and Terrestrial Data Analysis (oral) // Ассамблея COSPAR, 2–10 августа 2014.
- Kaftan V. N.** Periodicities in results of local structural monitoring using global navigation satellite systems (oral) // Ассамблея COSPAR, 2–10 августа 2014.
- Kaftan V., Komitov B., Lebedev S.** Caspian Sea Level and Cosmo-Geophysical Processes: Satellite and Terrestrial Data Analysis // COSPAR Moscow 2014 40th Scientific Assambly, Russia, Moscow, 2–10 August 2014, Book of abstracts (electronic) ISSN 1815-2619. Bremen, Deuschland, 2014.COSPAR_A2.1-0012-14.
- Kaftan V., Ustinov A.** Periodicities in results of local structural monitoring using global navigation satellite systems // COSPAR Moscow 2014 40th Scientific Assembly, Russia, Moscow, 2–10 August 2014, Book of abstracts (electronic) ISSN 1815-2619. Bremen, Deuschland, 2014.
- Kostianoy Andrey, Lebedev Sergey.** The Caspian Sea water dynamics based on satellite imagery and altimetry // 40th Scientific Assembles of Committee on Space Research (COSPAR), Moscow, Russia, 2–10 August 2014. COSPAR-A2.1-0013-14. (oral)
- Krasnoperov R. I.** Modern technological solutions for geophysical survey during the deployment of INTERMAGNET observatories in Russia (oral) // Международная Конференция "Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле", 8–13 сентября 2014 г., г. Петропавловск-Камчатский.
- Lavrova Olga, Mityagina Marina, Soloviev Dmitry, Kostianoy Andrey, Lebedev Sergey, Kalashnikova Nina, Kraushkin Evgeny** The impact of dynamic and circulation processes in sea surface pollution propagation // The 12th Biennial Conference Pan Ocean Remote Sensing Conference «Ocean Remote Sensing for Sustainable Resources» (PORSEC–2014), 4–7 November 2014, Bali, Indonesia. (Poster).
- Lebedev S. A.** Climate Change of the Adriatic Sea Level and Sea Surface Temperature Based on Satellite Altimetry and Radiometry // I International Scientific conference «Integrated Coastal Zone Management in the Adriatic Sea», 29 September – 1 October 2014, Kotor, Montenegro. Book of Abstracts. Podgorica: AP Print, 2014. P. 31.
- Lebedev S. A.** Detection and discrimination of different types of anthropogenic and biogenic pollution in the coastal zones based on hyperspectral and multispectral data analysis // The 12th Biennial

- Conference Pan Ocean Remote Sensing Conference «Ocean Remote Sensing for Sustainable Resources» (PORSEC–2014), 4–7 November 2014, Bali, Indonesia. (Poster).
- Lebedev S. A.** The Caspian Sea Water Dynamics Based on Satellite Altimetry and Imagery // The 12th Biennial Conference Pan Ocean Remote Sensing Conference «Ocean Remote Sensing for Sustainable Resources» (PORSEC–2014), 4–7 November 2014, Bali, Indonesia. (Oral).
- Lebedev S. A.** Time Space Variability of Petroleum Hydrocarbon Background Concentrations in the Baltic Sea Based on Remote Sensing Data and Simulation // The 12th Biennial Conference Pan Ocean Remote Sensing Conference «Ocean Remote Sensing for Sustainable Resources» (PORSEC–2014), 4–7 November 2014, Bali, Indonesia. (Oral).
- Lebedev S. A.** Climatic change of the Baltic Sea level and sea surface temperature based on satellite altimetry and radiometry // Baltic International Symposium (BALTIC), 2014 IEEE/OES, 2014, P. 1–5. doi: 10.1109/BALTIC.2014.6887870
- Lebedev S. A.,** Troitskaya Yu. I., Rybushkina G. V., **Dobrovolsky M. N.** Satellite altimetry of large lakes of the Baltic Basin // Baltic International Symposium (BALTIC), 2014 IEEE/OES, 03.09.2014. P. 1–5. doi:10.1109/BALTIC.2014.6887880
- Lebedev S. A.** River Volga Flood Propagation on the Caspian Sea Area Based on Satellite Altimetry // 40th Scientific Assemblies of Committee on Space Research (COSPAR), Moscow, Russia, 2–10 August 2014. COSPAR-A2.1-0051-14. (oral).
- Lebedev S. A.** Climatic change of the Baltic Sea level and sea surface temperature based on satellite altimetry and radiometry // Book of Abstracts. IEEE/OES Baltic International Symposium 2014, Tallinn, Estonia, 26–29 May 2014. P. 111.
- Lebedev S. A.,** Troitskaya Yu. I., Rybushkina G. V., **Dobrovolsky M. N.** Satellite altimetry of large lakes of the Baltic Basin // Book of Abstracts. IEEE/OES Baltic International Symposium 2014, Tallinn, Estonia, 26–29 May 2014. P. 67.
- Lukianova R. Yu.** Numerical model of the high latitude ionosphere taking into account the solar wind parameters // 40th Scientific Assemblies of Committee on Space Research (COSPAR), Moscow, Russia, 2–10 August 2014. (oral).
- Lukianova R. Yu.** Response of the high latitude magnetic field intensity to the exceptionally high solar wind streams // 40th Scientific Assemblies of Committee on Space Research (COSPAR), Moscow, Russia, 2–10 August 2014. (Poster).
- Lushnikov A. A., Kagan A. I., Lyubovtseva Yu. S., Gvishiani A. D.** Evolution equations for modelling the medico{demographic state in population (oral) // Abstracts International Conference on statistical physics, Sheraton Rhodes Resort, Rhodes – Greece, 7–11 July 2014. P. 71.
- Lushnikov A. A.** Multidisciplinary analytical geoinformation system for assessing the impact of environmental factors on human health // Крым Hi-Tech. Севастополь, 25–28 сентября 2014 г. (oral).
- Lushnikov A. A.** Intellectual geomedical system for the territories RF // Крым Hi-Tech. Севастополь, 25–28 сентября 2014 г. (Plenary + Moderator of the Session).
- Nikiforov O. V., Rybkina A. I., Pyatygina O. O., Bobkov A. E.** Method of spherical visualization, as modern technology of submission of geospatial data of earth sciences (oral) // International Conference "Modern Information Technologies in Earth Sciences". Petropavlovsk on Kamchatka, September 8–13, 2014. P. 87.

- Nikiforov O. V., Rybkina A. I.** Presentation of ORBUS software // Семинар "Monitoring of dynamic processes using spherical screens" 19–23 октября 2014 г., г. Ыаксинг, Китай. (устный).
- Nikiforov O. V.** Method of spherical visualization, as modern technology of submission of geospatial data of earth sciences (oral) // International Conference "Modern Information Technologies in Earth Sciences". Petropavlovsk on Kamchatka, September 8–13, 2014.
- Nisilevich M. V., Sergeyeva N. A., Zabarynskaya L. P.** Geophysical data provided by the World Data Centers for Solid Earth Physics and Solar-Terrestrial Physics, Moscow // XVI IAGA Workshop on geomagnetic observatory instruments, data acquisition and processing. October 7–16, 2014. Hyderabad, India.
- Sergeyeva N., Zabarinskaya L., Nisilevich M., Rodnikov A.** The Activities of the World Data Center for Solid Earth Physics, Moscow, Russia. 2012–2014 // Poster presentation. WDS Members' Forum, 2.11.2014, New-Delhi, India.
- Sergeyeva N. A., Zabarynskaya L. P., Krylova T. A., Nisilevich M. V.** Rescue of historical scientific data in the World Data Center for Solar-Terrestrial Physics // International Conference on Data Sharing and Integration for Global Sustainability (SciDataCon2014). 2–5 November 2014. New Delhi, India. 2 P.
- Soloviev A. A.** World Data Center for Solar-Terrestrial Physics and World Data Center for Solid Earth Physics Moscow, Russia // WDS Forum, 2–5 November 2014, New Delhi (India). (Poster).
- Soloviev A. A., Kaftan V. I., Krasnoperov R. I., Sidorov R. V.** Modern Technological Solutions for Geophysical Survey During the Deployment of INTERMAGNET observatories in Russia // Proceedings of the International Conference "Modern Information Technologies in Earth Sciences", Petropavlovsk on Kamchatka, September 8–13, 2014. P. 44.
- Soloviev A. A., Gvishiani A. D., Pyatygina O. O., Rybkina A. I., Nikiforov O. V.** Web Mapping Services for Providing Geological, Geophysical and Medical Geography Geodata // Proceedings of the International Conference "Modern Information Technologies in Earth Sciences", Petropavlovsk on Kamchatka, September 8–13, 2014. P. 90.
- Soloviev A. A., Bogoutdinov Sh. R., Agayan S. M.** New Fuzzy Logic Technique for Modelling Geomagnetic Secular Variation Using Onground Observations // Proceedings of the International Conference "Modern Information Technologies in Earth Sciences", Petropavlovsk on Kamchatka, September 8–13, 2014. P. 113–114.
- Soloviev A., Agayan S., Bogoutdinov Sh., Dzeboev B.** New methods of geoinformatics for analysing nonregular geophysical data // International Conference on Data Sharing and Integration for Global Sustainability (SciDataCon), 2–5 November 2014, New Delhi (India).
- Tatarinov V. N., Kagan A. I., Tatarinova T. A.** Hypothesis of geodynamic processes in the lithosphere under catastrophic earthquake Tohoku-Oki // International conference «GeoMod2014», Potsdam, Germany, 31 August 2014. P. 47–50. doi:10.2312/GFZ.geomod.2014.001
- Troitskaya Yuliya, Rybushkina Galina, Soustova Irina, Papko Vladislav, Baidakov Georgy, **Lebedev Sergey**, Andrey Panyutin. Adaptive re-tracking algorithm for retrieval of water level variations and wave heights from satellite altimetry data for middle-sized inland water bodies // 40th Scientific Assembles of Committee on Space Research (COSPAR), Moscow, Russia, 2–10 August 2014. COSPAR-A2.1-0013-15. (oral)

Zaalishvili V. B., Melkov D. A., **Dzeboev B. A.** Investigation of wavefield of intense seismic vibrations using multivariate statistical, polarization, spectral and wavelet analysis // Proceedings of Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, August 25–29, 2014.

Zabarinskaya L., Rodnikov A., Sergeeva N. Activization of ancient subduction zone and crust destruction on Sakhalin Island // Abstracts of EGU General Assembly, Vienna, 2014. V. 16. EGU2014-13.

ДИССЕРТАЦИИ

Дзебоев Б. А. Кластеризация в распознавании мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии и на Кавказе // диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 25.00.10 / Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. Москва, 2014. 132 с.

Лебедев С. А. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря // диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук: 28.00.29 / Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН. Москва, 2014. 350 с.

Соловьев А. А. Методы распознавания аномальных событий на временных рядах в анализе геофизических наблюдений: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук: 25.00.10 / Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Москва, 2014. 310 с.