

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Геофизический центр  
Российской академии наук

## **О Т Ч Е Т**

**О ВЫПОЛНЕНИИ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ**

**на 2018 год**

Москва  
2019

GEOPHYSICAL CENTER  
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

REPORT  
OF GEOPHYSICAL CENTER OF RAS  
FOR 2018

Results of the State Task

Moscow  
2019



The present edition contains information about the work of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (GC RAS) in 2018. The full list of GC RAS employees' publications in 2018 is also included. The edition is intended for specialists in the field of geophysics and related geosciences.

**Editors in chief:**

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

R. I. Krasnoperov, Scientific Secretary of GC RAS

**Editorial board:**

A. D. Gvishiani, Academician RAS, Chief Scientist

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

Approved for publishing on 02.12.2019

**Layout Production:**

E. O. Kedrov

Soloviev, A. A., R. I. Krasnoperov, Eds. (2019), Report of Geophysical Center of RAS for 2018: Results of the State Task, *Geoinf. Res. Papers*, Vol. 7, BS7005, <https://doi.org/10.2205/2019BS053>

<https://doi.org/10.2205/2019BS053>

<http://ebooks.wdcb.ru/2019/2019BS053/2019BS053.pdf>

M.: Geoinformatics Research Papers. Proceedings of the Geophysical Center RAS, 2019, 185 pp.

ISSN: 2308-5983

© 2019 Geophysical Center RAS



В настоящем издании содержатся сведения о выполнении государственного задания на 2018 год Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Геофизическим центром Российской академии наук, а также результаты научных исследований по грантам РНФ и РФФИ, список публикаций и результатов интеллектуальной деятельности (РИД).

Ответственные редакторы:

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

Р. И. Краснопёров, учёный секретарь ГЦ РАН

Редколлегия:

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

Э. О. Кедров, к.ф.-м.н.

Утверждено к печати 02.12.2019 г.

Компьютерная подготовка оригинал-макета:

Э. О. Кедров

<https://doi.org/10.2205/2019BS053>

<http://ebooks.wdcb.ru/2019/2019BS047/2019BS053.pdf>

Соловьёв, А. А., Р. И. Краснопёров (ред.) (2019) Отчет о выполнении государственного задания на 2018 год. М.: *Исследования по геоинформатике* т. 7, №2 (BS7005),

<https://doi.org/10.2205/2018BS053>

М.: Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН, 2019, 185 с., 76 ил., 3 таб.

# СОДЕРЖАНИЕ

1. Научная деятельность ГЦ РАН в 2018 году .....	7
2. Исследование кинематики блочных массивов при геодинамическом районировании мест размещения радиационно опасных объектов .....	16
3. Усовершенствование методов хранения, систематизации, визуализации и распространения больших массивов геофизических данных .....	29
4. Развитие методов и алгоритмов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений для оценки сейсмической опасности.....	45
5. Развитие новых методов интеллектуального анализа геомагнитных данных и системы наземных наблюдений магнитного поля Земли для изучения электромагнитных процессов в околоземном пространстве и их влияния на климат и технологическую инфраструктуру .....	57
6. Изучение современных геодинамических процессов в зоне контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты на основе системного анализа данных наблюдений спутниковыми системами GSP/ГЛОНАСС .....	69
7. Разработка методов системного анализа и геоинформатики для интеллектуального анализа геофизических данных на основе современных ГИС-технологий.....	77
8. Разноранговый системный анализ месторождений углеводородов в рамках ГИС-проекта “ROSA”.....	90
9. Разработка аналитической геоинформационной системы для формирования базы данных и цифровых карт для исследования месторождений стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации.....	97
10. Методы дискретной математики в задачах цифрового анализа геофизических данных на суперкомпьютере. Повышение точности прогноза состояния полярной ионосферы на основе численных моделей с применением методов ассимиляции данных .....	106
11. Разработка методов геомагнитного сопровождения наклонно-направленного бурения глубоких скважин в Арктике .....	114
12. Грант РФФ № 16-17-00121 «Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы» .....	122

<b>13. Грант РФФ № 17-17-01215 «Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа».....</b>	<b>132</b>
<b>14. Грант РФФ № 17-77-20034 «Разработка карт районирования характеристик геомагнитной активности для территории Российской Федерации».....</b>	<b>141</b>
<b>15. Грант РФФ № 18-17-00241 «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов».....</b>	<b>149</b>
<b>16. Грант РФФИ № 17-05-01085 «Методы циклостратиграфии в изучении отложений среднего и верхнего миоцена Восточного Паратетиса».....</b>	<b>163</b>
<b>17. Грант РФФИ № 18-55-05006 «Исследование динамики главного магнитного поля Земли и ионосферной токовой системы Sq с использованием новых методов интеллектуального анализа данных геомагнитных обсерваторий».....</b>	<b>169</b>
<b>18. Международная деятельность ГЦ РАН в 2018 году .....</b>	<b>175</b>
<b>19. Отчет о деятельности Национального геофизического комитета РАН в 2018 г.</b>	<b>180</b>

# 1. Научная деятельность ГЦ РАН в 2018 году

## 1.1. Государственное задание

Научная деятельность подразделений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизического центра Российской академии наук (ГЦ РАН) в 2018 году была сосредоточена на выполнении государственного задания № 007-00164-18-01, утвержденного 17 января 2018 г. с дополнениями от 01 ноября 2018 г.

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

Раздел IX. «Науки о Земле»:

- Подраздел 128 «Физические поля, внутреннее строение Земли и глубинные геодинамические процессы»;
- Подраздел 135 «Физические и химические процессы в атмосфере, включая ионосферу и магнитосферу Земли, криосфере и на поверхности Земли, механизмы формирования и современные изменения климата, ландшафтов, оледенения и многолетнемерзлых грунтов»;
- Подраздел 136 «Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий»;
- Подраздел 138 «Научные основы разработки методов, технологий и средств исследования поверхности и недр Земли, атмосферы, включая ионосферу и магнитосферу Земли, гидросферы и криосферы; численное моделирование и геоинформатика (инфраструктура пространственных данных и ГИС-технологии)».

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

1. Тема НИР «Исследование кинематики блочных массивов при геодинамическом районировании мест размещения радиационно опасных объектов».

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

0145-2016-0004 (АААА-А17-117012610082-9)

2. Тема НИР «Усовершенствование методов хранения, систематизации, визуализации и распространения больших массивов геофизических данных».

Руководители: в.н.с., к.ф.-м.н. Н.А. Сергеева; зав. лаб., к.ф.-м.н. Э.О. Кедров;  
зам. директора по развитию, к.г.-м.н. А.И. Рыбкина

0145-2016-0005 (АААА-А17-117012610076-8)

3. Тема НИР «Развитие методов и алгоритмов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений для оценки сейсмической опасности».

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

0145-2018-0001 (АААА-А18-118021990130-1)

4. Тема НИР «Развитие новых методов интеллектуального анализа геомагнитных данных и системы наземных наблюдений магнитного поля Земли для изучения электромагнитных процессов в околоземном пространстве и их влияния на климат и технологическую инфраструктуру».

Руководитель: ВРИО директора, чл.-корр. РАН А.А. Соловьев

0145-2018-0002 (АААА-А18-118021990126-4)

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

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

ППРАН № I.19 «Фундаментальные проблемы геолого-геофизического изучения литосферных процессов» (координатор Программы академик РАН М.А. Федонкин)

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

0145-2018-0003 (АААА-А18-118021990131-8)

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

ППРАН № I.19 «Фундаментальные проблемы геолого-геофизического изучения литосферных процессов» (координатор Программы академик РАН М.А. Федонкин)

Руководитель: ВРИО директора, чл.-корр. РАН А.А. Соловьев

0145-2018-0005 (АААА-А18-118021990127-1)

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

ППРАН № I.19 «Фундаментальные проблемы геолого-геофизического изучения

литосферных процессов» (координатор Программы академик РАН М.А. Федонкин)  
Руководитель: научный руководитель ГЦ РАН, академик РАН А.Д. Гвишиани  
0145-2018-0006 (АААА-А18-118021990124-0)

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

ППРАН № I.48 «Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения» (координатор Программы академик РАН Н.С. Бортников)

Руководитель: научный руководитель ГЦ РАН, академик РАН А.Д. Гвишиани  
0145-2018-0004 (АААА-А18-118021990125-7)

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

ППРАН № I.27 «Фундаментальные проблемы решения сложных практических задач с помощью суперкомпьютеров» (координатор Программы академик РАН В.Б. Бетелин)

Руководитель: научный руководитель ГЦ РАН, академик РАН А.Д. Гвишиани  
0145-2018-0007 (АААА-А18-118021990132-5)

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

ППРАН № I.55 «Арктика — научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития» (координатор Программы академик РАН А.И. Ханчук)

Руководитель: научный руководитель ГЦ РАН, академик РАН А.Д. Гвишиани  
0145-2018-0008 (АААА-А18-118021990129-5)

## **1.2. Проекты научных фондов**

В 2018 году в ГЦ РАН выполнялись работы по 2 грантам РФФИ и 4 грантам РНФ:

1. Грант РФФИ № 17-05-01085 «Методы циклостратиграфии в изучении отложений среднего и верхнего миоцена Восточного Паратетиса».

Руководитель: зам. директора, к.г.-м.н. А.И. Рыбкина  
АААА-А17-117040510185-1

2. Грант РФФИ № 18-55-05006 «Исследование динамики главного магнитного поля

Земли и ионосферной токовой системы Sq с использованием новых методов интеллектуального анализа данных геомагнитных обсерваторий».

Руководитель: зам. директора, чл.-корр. РАН А.А. Соловьев  
AAAA-A18-118030290123-2

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

Руководитель: г.н.с., д.ф.-м.н. В.А. Пилипенко  
AAAA-A16-116030110009-6

4. Грант РФФИ № 17-17-01215 «Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа».

Руководитель: зам. директора, чл.-корр. РАН А.А. Соловьев  
AAAA-A18-118021990128-8

5. Грант РФФИ № 17-77-20034 «Разработка карт районирования характеристик геомагнитной активности для территории Российской Федерации».

Руководитель: ученый секретарь, к.ф.-м.н. Р.И. Красноперов  
AAAA-A18-118021990123-3

6. Грант РФФИ № 18-17-00241 «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов».

Руководитель: научный руководитель ГЦ РАН, академик РАН А.Д. Гвишиани  
AAAA-A18-118091090066-5

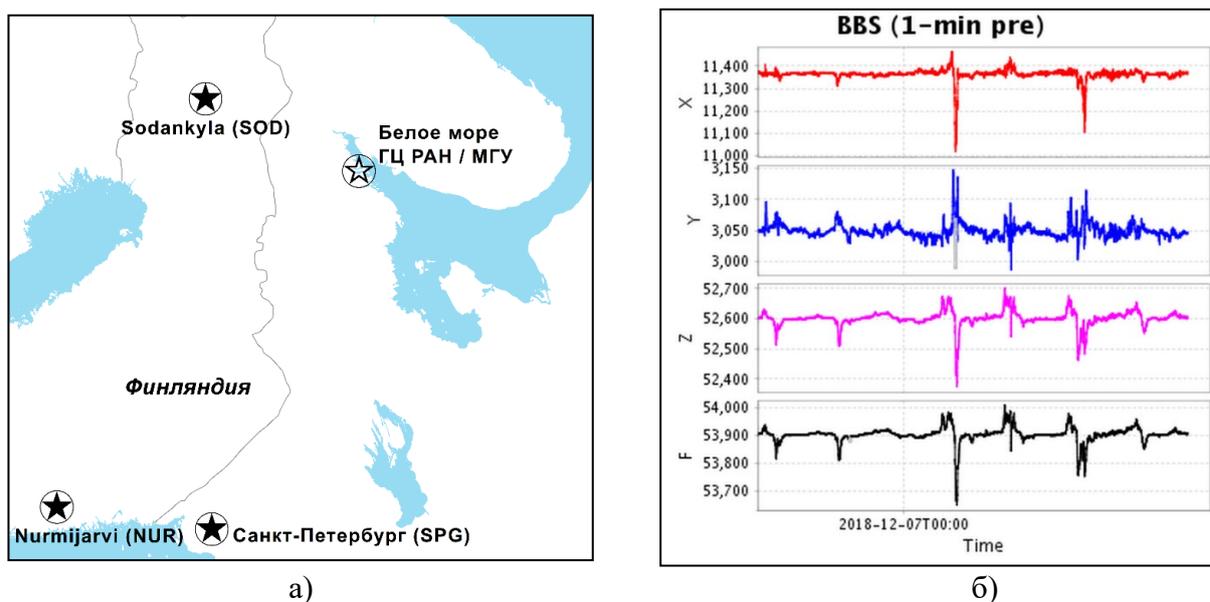
### **1.3. Важнейшие результаты фундаментальных научных исследований**

#### **Новая магнитная обсерватория «Белое море»**

*(Тема НИР «Развитие новых методов интеллектуального анализа геомагнитных данных и системы наземных наблюдений магнитного поля земли для изучения электромагнитных процессов в околоземном пространстве и их влияния на климат и технологическую инфраструктуру»)*

В 2018 г. ГЦ РАН при содействии МГУ им. М.В. Ломоносова была введена в строй новая магнитная обсерватория на базе Беломорской биологической станции им. Н.А. Перцова (Карелия). На обсерватории установлен не имеющий мировых аналогов отечественный магнитометр экспериментальной конструкции, созданный в Уральском федеральном университете. Прибор позволяет регистрировать вариации ортогональных

компонент полного вектора магнитного поля и его модуль с высоким временным разрешением. Обсерватория расположена в высокоширотной области вблизи полярного круга ( $66,55^\circ$  с.ш.), что делает её исключительно важным элементом сети геомагнитных наблюдений РАН в Арктической зоне РФ (АЗРФ). Данные, регистрируемые на этой обсерватории, будут крайне востребованы российским и мировым научным сообществом, ведущим фундаментальные исследования в области геомагнетизма и солнечно-земного взаимодействия. Регистрируемая на обсерватории информация оперативно передается в Центр геомагнитных данных, созданный в ГЦ РАН. С помощью разработанных в ГЦ РАН программных инструментов происходит интеллектуальный многокритериальный анализ данных в квазиреальном времени с целью оперативного контроля их качества и выявления аномальных событий на магнитных записях. Созданная обсерватория внесет весомый вклад в исследование эффектов космической погоды, мониторинг магнитного поля Земли, облегчая процедуры его оперативного моделирования.



**Рисунок 1.1 – Магнитная обсерватория «Белое море»: а) карта расположения обсерватории (черными звездами отмечены магнитные обсерватории международной сети INTERMAGNET); б) магнитограммы с обсерватории «Белое море» (4–10.12.2018)**

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

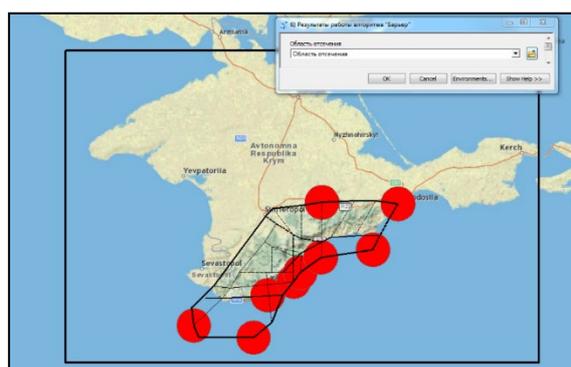
## ГИС-ориентированная база данных по оценке сейсмической опасности для регионов Кавказ и Крым

(Тема НИР «Развитие методов и алгоритмов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений для оценки сейсмической опасности»)

Создание экспертных ГИС-ориентированных систем, нацеленных на проведение многокритериального анализа есть актуальная и важная задача геоинформатики. Для оценки сейсмической опасности и минимизации последствий возможных сильных землетрясений на Кавказе и в Крыму создана специализированная ГИС-база данных и многофункциональный пользовательский интерфейс для работы с ней. Впервые в единой геоинформационной среде собраны подробные результаты распознавания зон повышенной сейсмической опасности для Кавказа и Крыма, а также исходные данные, лежащие в основе распознавания. Разработанная база данных дает возможность проведения комплексной, многокритериальной оценки сейсмической опасности в заданных регионах. Интегрированные в ГИС-базу данных инструменты научного анализа и интерактивных запросов дают возможность исследователю самостоятельно по различным критериям оценивать степень сейсмической опасности интересующих его районов. Исследователь самостоятельно проводит системный анализ результатов, полученных различными методами распознавания образов, и формулирует результат с учетом тех или иных специфических требований. Это важный шаг вперед в развитии геоинформатики.



а)



б)

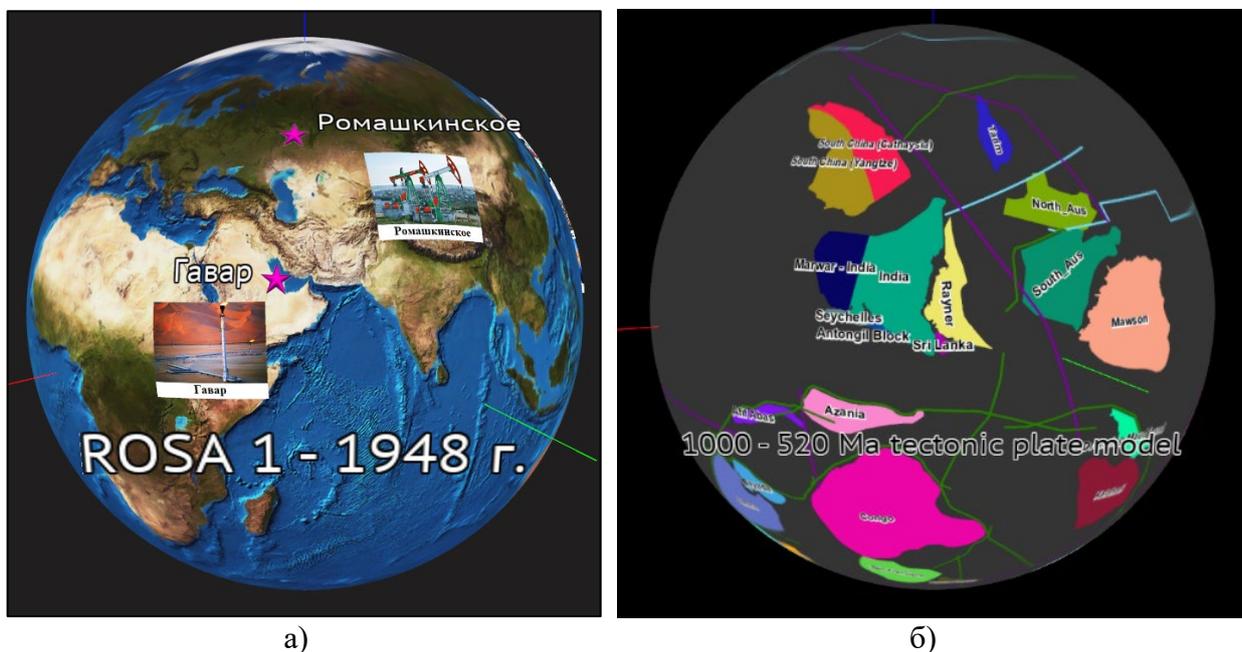
**Рисунок 1.2 – Визуализация слоев ГИС-базы данных для Крыма: а) схема морфоструктурного районирования, б) высокосейсмичные ( $M_0 \geq 6$ ) пересечения морфоструктурных линейных элементов**

Соловьев Ан.А., Соловьев Ал.А., Гвишиани А.Д., Николов Б.П., Николова Ю.И. (2018), ГИС-ориентированная база данных по оценке сейсмической опасности для регионов Кавказа и Крыма, *Исследование Земли из космоса*, № 5. сс. 52—64. doi: 10.31857/S020596140003241-6

## Динамическая визуализация базы геопроостранственных данных на цифровом демонстрационном комплексе со сферическим экраном посредством ПО ORBUS 2.0

(Тема НИР «Усовершенствование методов хранения, систематизации, визуализации и распространения больших массивов геофизических данных»)

Создание новых методов динамической визуализации есть важная часть геоинформатики. В этом направлении был сделан крупный шаг вперед, а именно разработан набор сферических слайдов, реализуемый на цифровом комплексе со сферическим экраном на базе ПО ORBUS. Системный подход и разработанная многоуровневая база данных выводят визуализацию на новый уровень и позволяет использовать широкое многообразие дополнительных параметров для проведения пространственного и объектно-ориентированного аналитического исследования. Разработанный набор динамических сферических слайдов является полезным инструментом визуализации научных данных. ГЦ РАН при содействии Новосибирского государственного университета создал демонстрационный комплекс со сферическим экраном, используемый для визуализации результатов, полученных в рамках проектов по программам РАН. Среди них — развитие методов добычи углеводородов, изучение магнитного поля Земли, тектонические палеорекострукции и др.



**Рисунок 1.3 – Пример оформления динамических слайдов в ПО ORBUS: а) визуализация базы данных крупнейших месторождений углеводородов ROSA-1, б) динамическая карта тектонических палеорекострукций**

Динамические сферические слайды используются в научных и образовательных целях. Они являются важным инструментом популяризации знаний и адаптации научных

исследований для широкой аудитории. Полученный результат является важным шагом в сторону развития эффективного взаимодействия науки, образования и производства.

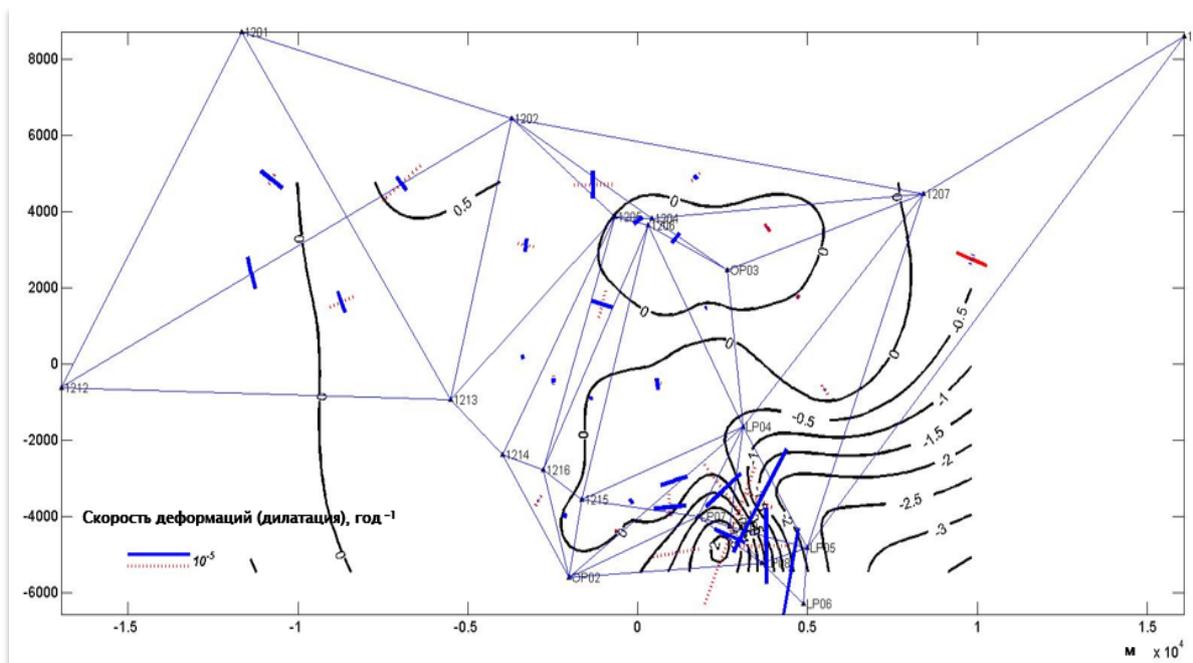
Odintsova A., Gvishiani A., Nakicenovic N., Rybkina A., Busch S., Nikolova J. (2018), The world's largest oil and gas hydrocarbon deposits: ROSA database and GIS project development, *Russian Journal of Earth Sciences*, Vol. 18. ES3002. doi: 10.2205/2018ES000621

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

### **Методика определения движений и деформаций земной коры на основе ГНСС-наблюдений**

*(Грант РФФИ 18-17-00241 «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов»)*

Разработана оригинальная методика определения деформаций земной коры по данным ГНСС-наблюдений на локальных геодинамических полигонах, основанная на использовании временных разностей ГЛОНАСС/GPS измерений. Методика обеспечивает ослабление односторонне действующих ошибок в процессе полевых измерений и их математической обработки, включающая в себя процедуры эталонирования измерительной аппаратуры и масштабирование искомым деформаций. Средняя квадратическая ошибка измерений длин базисных линий на эталонном базисе Федерального центра геодезии составила 2,4 мм, при заявленной фирмой производителем ГНСС-аппаратуры 3,0 мм, что свидетельствует об отсутствии статистически значимой систематической ошибки в измерениях. Это позволяет проводить кинематическое геодинамическое районирование территорий с малыми скоростями современных движений земной коры, а также в районах расположения особо ответственных промышленных объектов. Методика использована при сеймотектоническом анализе наблюдений на геодинамическом полигоне при строительстве первого в России пункта глубинного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в геологических формациях, расположенного в Красноярском крае.



**Рисунок 1.4 – Деформации главных растяжений-сжатий (красный цвет – растяжения, синие – сжатия) и дилатации (черные изолинии) за 2012–2016 гг. Сечение изолиний  $0,5 \times 10^{-5}$ . Средние квадратические ошибки определения деформаций не превышают  $10^{-6}$ . Аномальные неоднородности, выраженные сгущением изолиний дилатации и осями главных растяжений/сжатий, достигающих  $10^{-5}$ , расположены в южной части территории**

Кафтан В.И., Гвишиани А.Д., Морозов В.Н., Татаринов В.Н. (2018) Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов, *Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса*, Т. 16, № 1, сс. 83–94. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94

## **2. Исследование кинематики блочных массивов при геодинамическом районировании мест размещения радиационно опасных объектов**

**Номер регистрации в ИС Минобрнауки: 0145-2016-0004**

**Номер госрегистрации: АААА-А17-117012610082-9**

**Руководитель: д.т.н. В.Н. Татаринов**

**Ответственные исполнители: д.т.н. В.Н. Морозов, д.т.н. В.И. Кафтан,  
д.ф.-м.н. И.Ю. Колесников, А.И. Маневич**

Цель исследований – разработка геоинформационных методов анализа и прогноза состояния геологической среды для геодинамического районирования мест размещения объектов использования атомной энергии и обоснования методов исследований в подземной исследовательской лаборатории в пределах Нижнеканского массива (Красноярский край).

### **2.1. Разработка моделей напряженно-деформированного состояния блочных гетерогенных массивов с учетом сейсмологических данных**

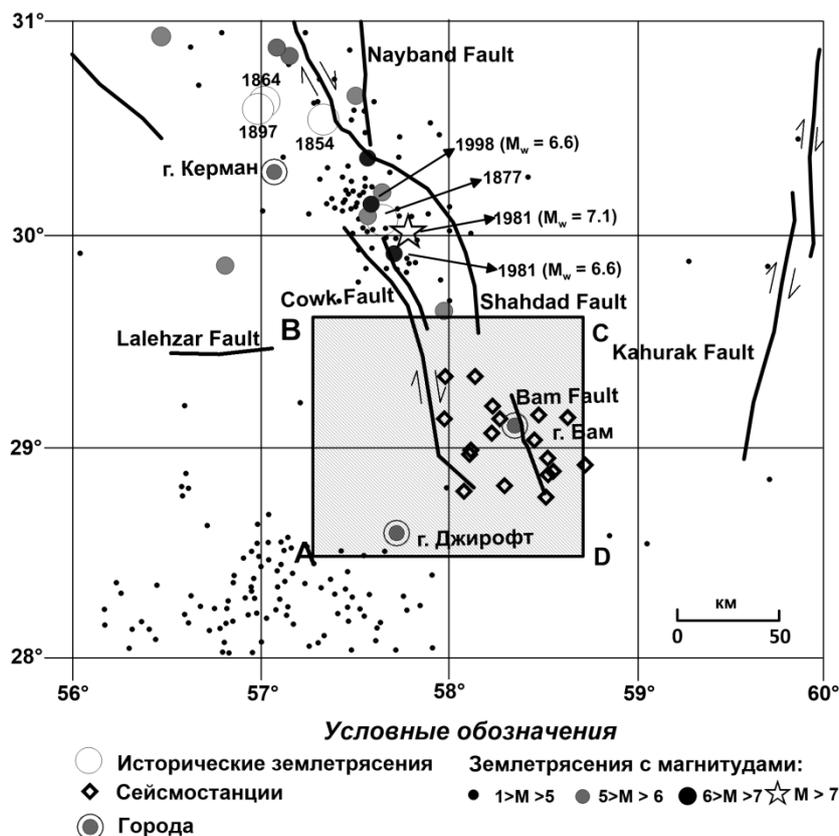
На основе разработанной в 2016–2017 гг. методологии анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) эпицентральных зон землетрясений ниже приводятся полученные результаты моделирования по трем крупным землетрясениям в Турции, 13.03.1992, [Морозов, Маневич, 2018а], Иране, 26.12.2003 [Морозов и др., 2018б] и США, 24.08.2014, М 6 [Морозов и др., 2018в].

Расчет НДС в массиве производится методом конечных элементов в форме перемещений на основе четырехугольных изопараметрических элементов. Выбор метода обусловлен как физическими соображениями, обеспечивающими условия минимизации полной потенциальной энергии деформации для всего массива, так и эффективностью его компьютерной реализации. Проиллюстрируем методику моделирования на примере землетрясения на юго-востоке Ирана в районе города Бам, которое произошло 26 декабря 2003 г. с сейсмическим моментом  $6 \div 9 \times 10^{18} \text{ Nm}$ .

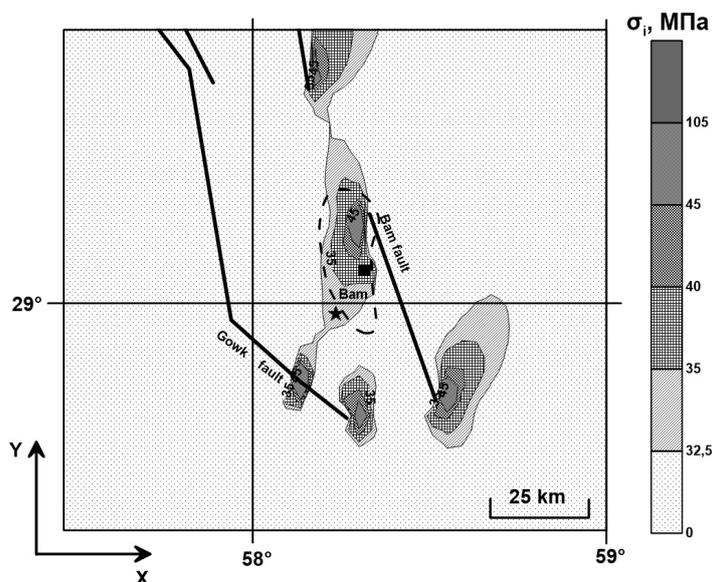
Структурно-тектоническая схема и эпицентры сильных землетрясений показаны на рисунке 2.1. Были заданы следующие граничные условия: внешнее поле напряжений  $\sigma_{yy} = -30 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{xx} = -10 \text{ МПа}$ , модуль упругости пород кристаллического фундамента  $E = 8 \times 10^3 \text{ МПа}$ , модуль упругости разломных зон  $E = 8 \times 10 \text{ МПа}$ , коэффициент Пуассона  $\mu = 0,25$ .

На рисунке 2.2 приведена рассчитанная карта распределения интенсивности

напряжений до землетрясения 26 декабря 2003 г. На ней выделяются зоны высокой интенсивности напряжений, которые можно было бы априори связать с возможными зонами зарождения и развития разрыва.



**Рисунок 2.1 – Структурно-тектоническая схема и эпицентры сильных землетрясений в районе города Бам (Иран). ABCD – область моделирования**



**Рисунок 2.2 – Карта интенсивности напряжений  $\sigma_i$  до землетрясения. Пунктирная линия – площадь локализации эпицентров афтершоков**

На рисунке 2.3 приведена карта отношений компонент напряжений  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx}$ . Можно

видеть, что при исходном фоновом значении  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 3$ , в центральной зоне между разломами эта величина превышает фоновые значения в 6 и более раз.

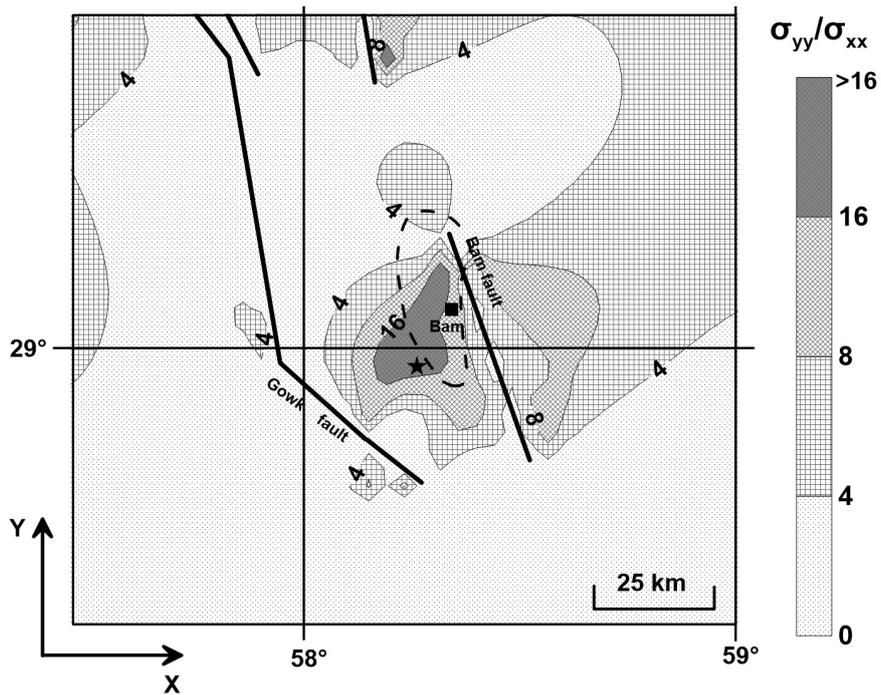


Рисунок 2.3 – Карта отношений  $\varphi \left( \frac{\sigma_{yy}}{\sigma_{xx}} \right)$  до землетрясения

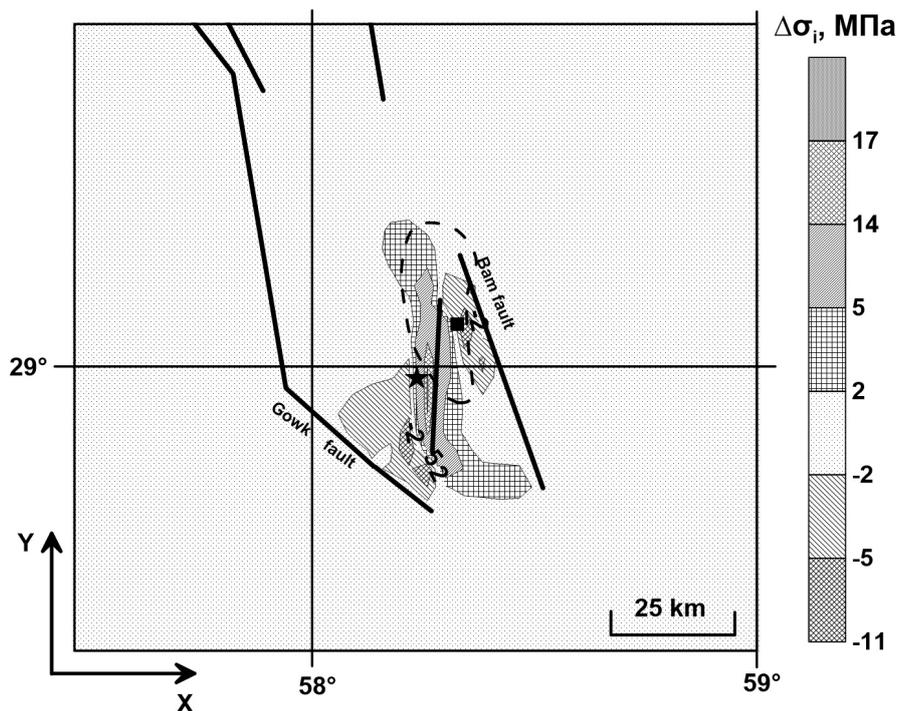


Рисунок 2.4 – Карта разности интенсивности напряжений ( $\Delta\sigma_i$ ) до и после землетрясения

Аналогичные результаты были получены ранее при моделировании НДС эпицентральных зон сильных землетрясений в Индии и Турции [Морозов, 2017]. В тоже

время эпицентр главного толчка попадает в область высоких значений  $\sigma_{yy}$  при минимальных значениях  $\sigma_{xx}$ , переходящих в напряжения растяжения.

На рисунке 2.4 приведена карта разности интенсивности напряжений до и после землетрясения  $\Delta\sigma_i$ . В области, прилегающей к предполагаемому разлому, уровень интенсивности напряжений становится существенно ниже предшествующего уровня до образования разрыва при землетрясении. Одновременно возникают новые зоны повышенной интенсивности напряжений. Можно видеть, что зона эпицентров афтершоков локализована в основном в зоне сброшенной интенсивности напряжений.

Общие выводы по результатам моделирования следующие:

1. Эпицентр землетрясения в регионе г. Бам (Иран) локализован в области аномально высокой интенсивности напряжений, полученной по данным моделирования НДС эпицентрального района;
2. Можно предположить, что «точка старта» (гипоцентр землетрясения) связана с напряженным состоянием геологической среды в условиях, когда высокие напряжения меридионального сжатия  $\sigma_{yy}$  вызывают разрушение при минимальных напряжениях сжатия, переходящих в напряжения растяжения  $\sigma_{xx}$ ;
3. Результаты моделирования НДС в области очага землетрясения 26 декабря 2003 г. соответствуют механизму очага главного толчка, полученного по сейсмическим данным;
4. Ориентация «плоскости» предполагаемого разрыва и его длина адекватны зоне высокой интенсивности напряжений, полученной в результате моделирования НДС эпицентральной зоны землетрясения 26 декабря 2003 г. с  $M_w$  6,6;
5. Последовавшие после главного толчка сильные афтершоки локализованы в зоне аномально высокой интенсивности напряжений, предшествующей главному толчку;
6. После образования тектонического разлома НДС эпицентральной зоны изменяется. Возникают области сброса интенсивности, примыкающие к вновь образовавшемуся разрыву и области возросшей интенсивности напряжений;
7. Зона эпицентров афтершоков (включающая более 1000 событий) протяженностью 26 км и шириной 7 км локализована в зоне высокой интенсивности напряжений, предшествующих главному толчку. В этой зоне после землетрясения (т.е. после образовавшегося нового разрыва) интенсивность напряжений существенно снизилась в результате развития последующего афтершокового процесса.

## 2.2. Разработка и оценка эффективности алгоритма выявления аномальных деформаций земной коры на разных пространственных масштабных уровнях на основе распознавания образов

Методика сбора и обработки данных наблюдений за современными движениями земной коры (СДЗК) на основе ГНСС была разработана в лаборатории геодинамики ГЦ РАН [Докукин и др., 2010; Kaftan et al, 2016]. Для выявления особенностей деформаций на разных масштабных уровнях нами начата разработка методики и алгоритма прогноза опасных деформаций в районе расположения ОИАЭ с учетом пространственного масштабного эффекта. Ниже представлена схема алгоритма и результаты его апробации на примере временных рядов наблюдений по Калифорнии [GPS Data, 2018].

Общая постановка задачи классификации сформулирована следующим образом. Пусть  $X$  – множество наблюдений деформаций, оно может быть разбито на множество классов  $Y_1, \dots, Y_i$ . Целиком само разбиение не известно, и в каждом классе отсутствуют подмножества элементов, о которых известна их классовая принадлежность, однако задается количество искомых классов. Соответственно, отсутствует обучающая выборка, и распознавание нужно проводить методами «без учителя». Каждому элементу множества соответствует признаковое описание  $x = (f_1(x), \dots, f_i(x))$ . Требуется построить алгоритм, который отобразит зависимость  $X \rightarrow Y$ , способный классифицировать произвольный объект  $x \in X$ .

В качестве исследуемого параметра пространственных особенностей скоростей СДЗК была выбрана скорость относительного изменения дистанции (расстояния между двумя точками на поверхности сферы) между геодезическими пунктами (но отметим, что формула не влияет на сам алгоритм):

$$\varepsilon' = \varepsilon/T, \quad (1)$$

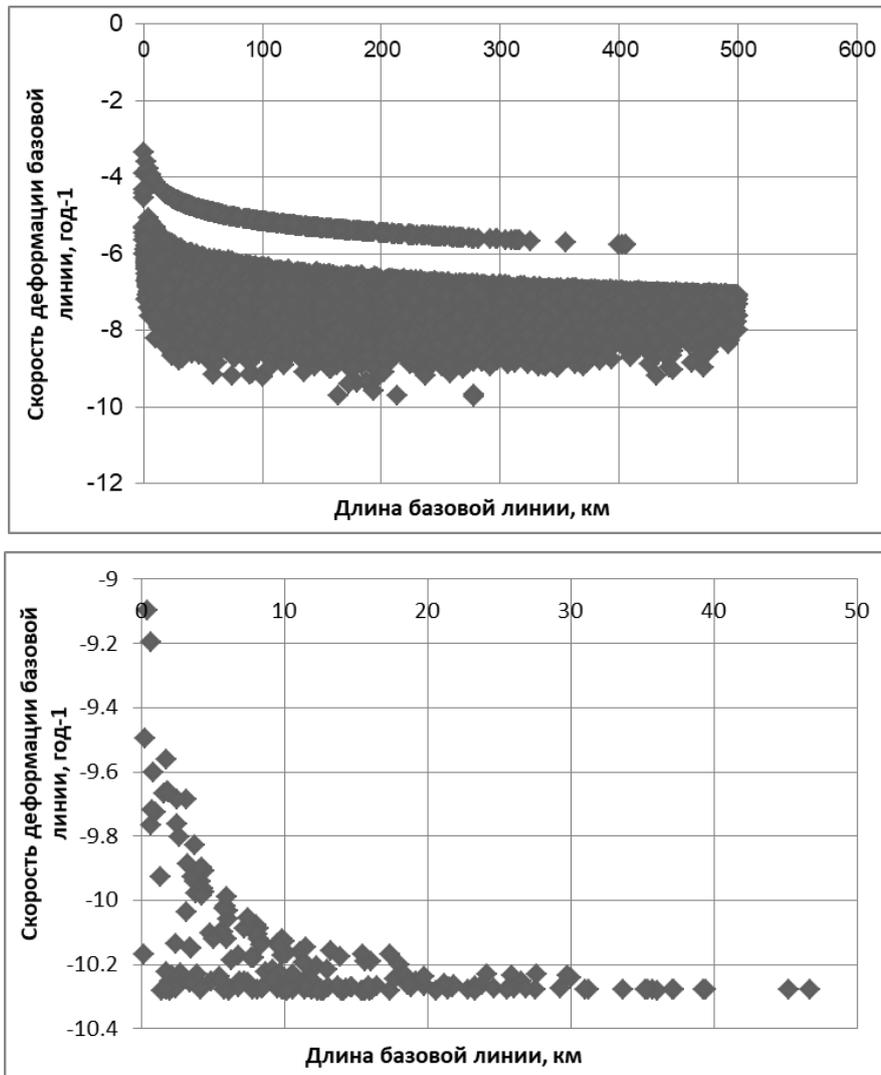
где  $\varepsilon = \Delta L/L$  – относительное изменение длины  $L$  между пунктами за временной интервал  $T$  между двумя точками наблюдений.

Длина дуги  $L$  (км) определялась по формуле:

$$L = \arccos[\sin(\alpha_1) \times \sin(\alpha_2) + \cos(\alpha_1) \times \cos(\alpha_2) \times \cos(\beta_1 - \beta_2)] \times R, \quad (2)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – широта двух пунктов;  $\beta_1, \beta_2$  – долгота двух пунктов;  $R$  – средний радиус земного шара, принимается 6371 км.

Пример визуализации расчетных данных представлен на рисунке 2.5.



**Рисунок 2.5 – Графики  $\varepsilon'(L)$ , в логарифмической шкале. I – более 90 000 базовых линий, полигон Southern California Network службы USGS (GPS Data, 2018); II – 190 базовых линий (Нижнеканский массив)**

Полученные данные являются исходными для распознавания. Формируется база данных, в которую заносятся значения признаков для каждого значения деформации:

- расчетное значение деформации или дилатации;
- значение нормирования (расстояние, площадь и т.д.);
- отклонение  $d\varepsilon'$ , рассчитывается по формуле (3):

$$d\varepsilon' = \varepsilon'_i - \varepsilon'_{i+1}, \quad (3)$$

где  $i$  – порядковый номер значения деформации.

- Отклонение  $dL$ , рассчитывается по формуле (2.5):

$$dL = L_i - L_{i+1}, \quad (4)$$

где  $i$  – порядковый номер значения деформации.

- Плотность отклонения  $\psi$ :

$$\psi_i = \varepsilon'_i / L_i, \quad (5)$$

В настоящей работе выделяются два класса деформаций:

- Значения характерные (условно «не опасные») для деформационного режима исследуемого полигона;
- Значения, не попадающие в первую группу и превышающие их по абсолютным значениям (условно «опасные»).

Решающие правила строятся на основе анализа превышения плотности отклонения  $\psi$  и расчетного значения деформации  $\varepsilon'(L)$  порогового эвристического значения  $t_{\psi, \varepsilon}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon'_i(L) > t_\varepsilon(i - n, i + n) \\ \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon'_i(L) > t_\varepsilon(i - n, i + n) \\ \psi_i > t_\psi(i - n, i + n) \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (6)$$

или в булевых операторах:

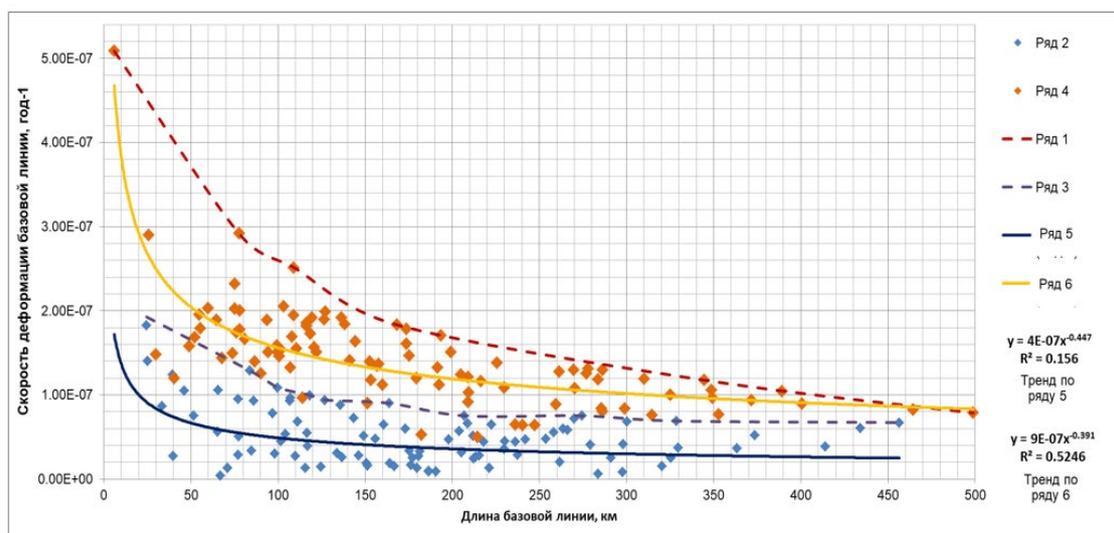
$$\varepsilon'_i(L) > t_\varepsilon(i - n, i + n) \wedge \left( \varepsilon'_i(L) > t_\varepsilon(i - n, i + n) \wedge \psi_i > t_\psi(i - n, i + n) \right) \quad , \quad (7)$$

где  $t$  — пороговое эвристическое значение деформации или плотности отклонения для окрестности значений  $i - n, i + n$ ;  $n$  – полуинтервал оценки порогового значения  $t$ .

Пороговое значение  $t$  рассчитывается как оценка значений интервала (окна) выбранной точки в окрестности  $(i - n, i + n)$ . Размер интервала зависит от количества пунктов наблюдений (т.е. количества базисных линий), их средней частоты на выбранной дистанции.

Результаты тестирования приведены на рисунке 2.6. Полученные результаты позволяют выделить в облаке начальных данных скоростей деформаций два класса: характерные для геодинамического режима исследуемого района, которые мы принимаем как «неопасные», и превышающий их класс, которые мы считаем «опасными». В то же время такие оценки будут полезны при оценках инженерных критериев безопасности эксплуатации ОИАЭ с учетом масштабного эффекта.

Развитие и применение алгоритмов обработки данных скоростей СДЗК на основе применения ГНСС будет способствовать анализу результатов режимных геодинамических наблюдений, позволит выявлять участки с аномально высокими скоростями деформаций земной поверхности.



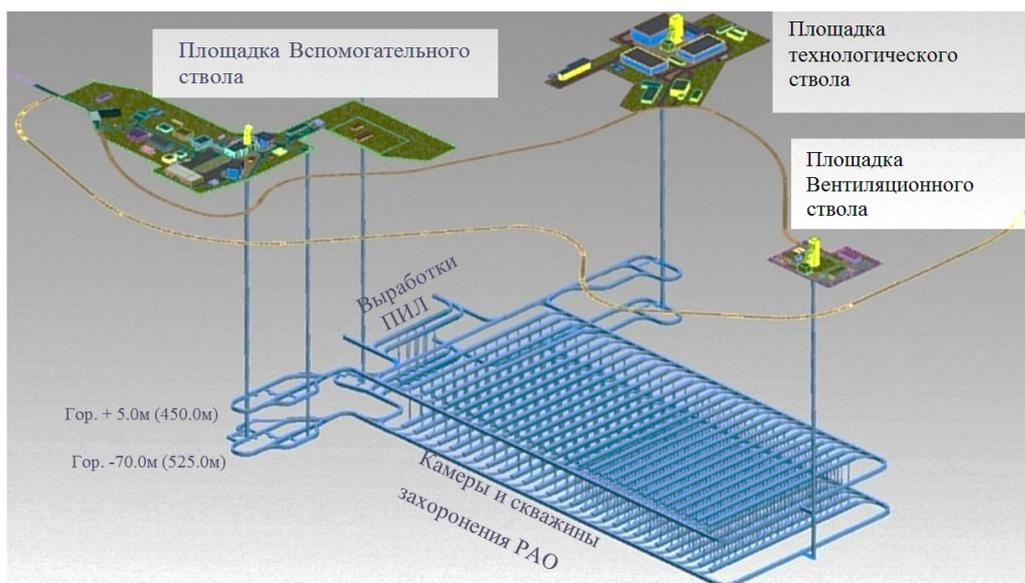
**Рисунок 2.6 – График распознанных скоростей деформаций исследуемого полигона: ряд 1 – предельные скорости деформаций; ряд 2 – первая группа характерных скоростей деформаций; ряд 3 – граничная кривая между двумя группами; ряд 4 – вторая группа опасных скоростей деформаций; ряд 5 – аппроксимация первой группы; ряд 6 – аппроксимация второй группы**

### 2.3. Обоснование комплекса методов геодинамических и геомеханических исследований в подземной исследовательской лаборатории на участке Енисейский Нижнеканского массива (Красноярский край)

Цель создания подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) в пределах Нижнеканского массива – окончательное подтверждение долговременной безопасности захоронения твердых высокоактивных долгоживущих и твердых среднеактивных долгоживущих РАО (РАО класса 1 и 2). Строительство ПИЛ будет начато в 2019 году.

Пункт глубинного захоронения высокоактивных отходов (ПГЗРО) состоит из наземной и подземной части (рис. 2.7). Подземная часть размещена на глубине 450–600 м и состоит из: 3-х шахтных стволов до глубины 510 м, горизонтальных выработок захоронения РАО на горизонтах 450 м и 525 м, и пробуренных из них вертикальных скважин глубиной 75 м.

Важнейшим этапом создания ПИЛ является выбор и обоснование эффективных методов исследования состояния породного массива. В этой связи были проведены НИР, направленные на обоснование геомеханических, геодинамических и сейсмотектонических методов исследований в ПИЛ. Ниже приводится перечень исследований и экспериментов в ПИЛ по направлениям – *геодинамика, геомеханика и сейсмотектоника*. Результаты исследований были представлены на заседании секции №1 НТС №10 ГК «Росатом» «Экологическая и радиационная безопасность пунктов долговременного хранения, консервации и захоронения РАО» 10 октября 2018 г.



**Рисунок 2.7 – Принципиальная схема ПГЗРО в Нижнеканском массиве**

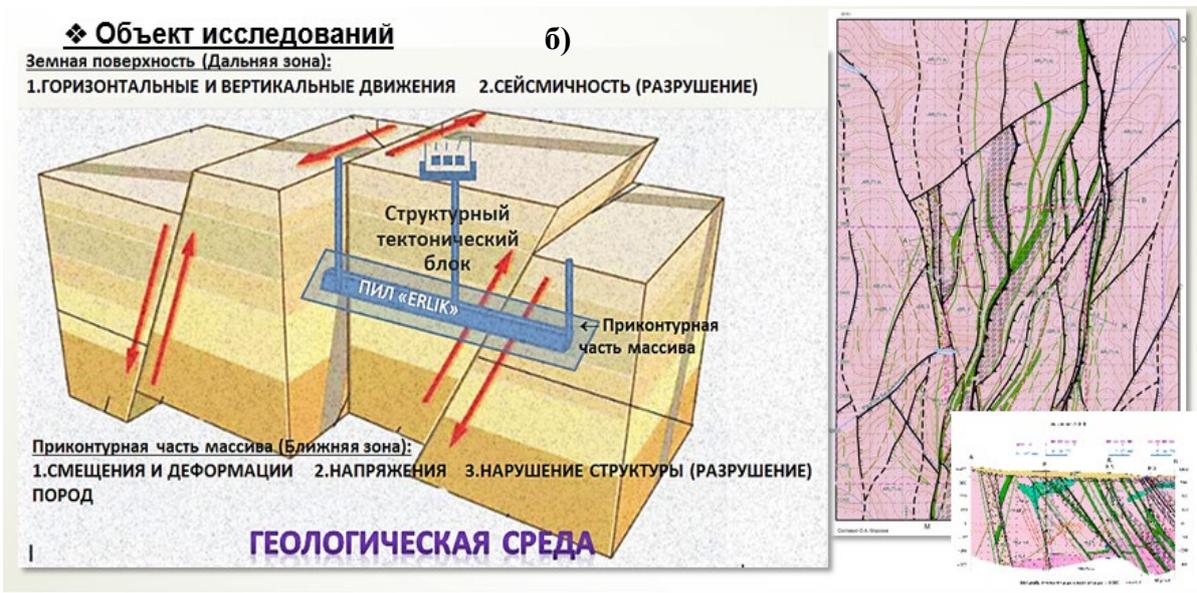
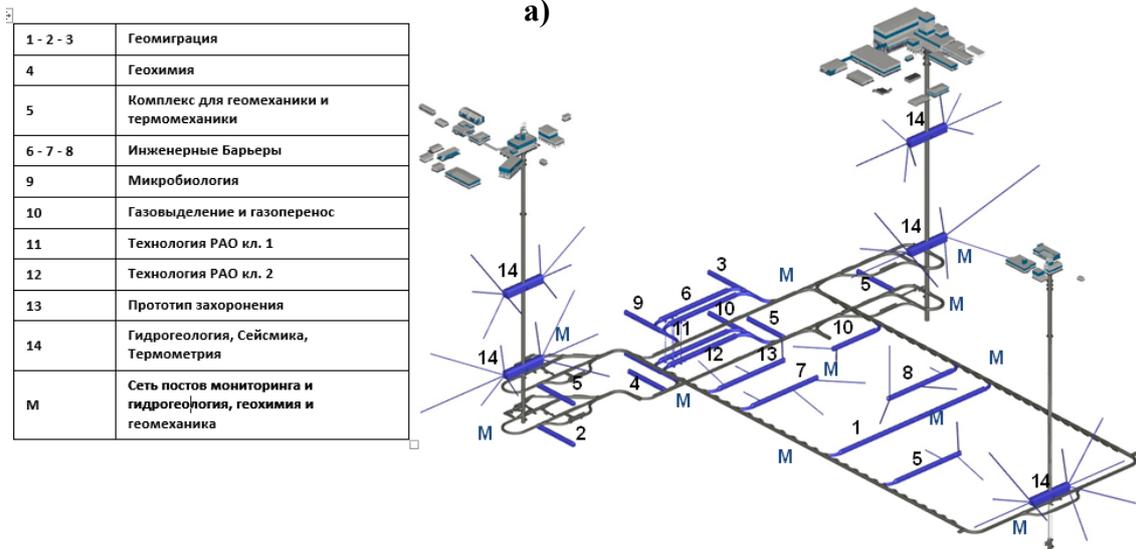
Исследования и эксперименты по указанным направлениям разделены на две группы по месту их проведения (рис. 2.8).

В табл. 2.1 указан предварительный перечень экспериментов, имеющих отношение к изучению геодинамики, геомеханики и сейсмотектоники при строительстве ПИЛ и ПГЗРО, структурированных по группам:

1. изучение современных движений земной коры;
2. изучение свойств горных пород;
3. изучение напряжений в массиве;
4. изучение смещений и расслоения приконтурной части породного массива;
5. изучение трещиноватости приконтурной части массива;
6. изучение техногенного воздействия на массив.

Структура исследований и экспериментов в ПИЛ приведена на рисунке 2.9.

Детальное обоснование методов и экспериментов изложено в окончательном отчете по теме, а также в [Морозов В.Н., 2018д]



**Рисунок 2.8 – Предварительная схема исследовательских выработок в подземной исследовательской лаборатории (по данным ИБРАЭ РАН) (а) (синим цветом выделены специально создаваемые исследовательские выработки) и объект исследований в дальней и ближней зоне ПИЛ (б)**

Таблица 2.1

## Список методов исследований и экспериментов в ПИЛ

п/п	Обозначение	Наименование эксперимента	Примечание
<b>А. Исследования в дальней зоне ПИЛ</b>			
<i>Изучение современных движений земной коры</i>			
1	АЗ-1	Мониторинг современных движений земной коры ГНСС-методами	На земной поверхности
2	АЗ-2	Наблюдения за вертикальными движениями земной поверхности методом высокоточного повторного нивелирования	На земной поверхности
3	АЗ-3	Гравиметрические наблюдения на земной поверхности	На земной поверхности
4	АЗ-4	Сейсмологический мониторинг на земной поверхности	На земной поверхности
<b>Б. Исследования в ближней зоне ПИЛ</b>			
<i>Изучение свойств горных пород</i>			
5	БЗ-1	Физико-механические свойства горных пород	В выработках
<i>Изучение напряжений в массиве</i>			
6	БЗ-2	Определение величин и ориентации напряжений методом разгрузки керна	В выработках
7	БЗ-3	Определение величин и ориентации напряжений с использованием деформометров	В выработках
8	БЗ-4	<i>Изучение напряжений методом гидроразрыва</i>	В выработках
9	БЗ-5	Определение напряжений в массиве пород методом дискования керна	В выработках
<i>Изучение смещений и расслоения приконтурной части породного массива</i>			
10	БЗ-6	<i>Исследование трещин, формирующихся в ходе проведения горнопроходческих работ</i>	В выработках
11	БЗ-7	Определение конвергенции подземных выработок методом глубинных реперов	В выработках
<i>Изучение трещиноватости приконтурной части массива</i>			
12	БЗ-8	Изучение трещиноватости геофизическими методами	В выработках
13	БЗ-9	Определение степени раскрытия крупных трещин	В выработках
<i>Изучение техногенного воздействия на массив</i>			
14	БЗ-10	Изучение удароопасности пород при проходке выработок	В выработках
15	БЗ-11	Исследования стабильности предохранительного целика	В выработках
16	БЗ-12	Сейсмоакустический мониторинг состояния массива при нагреве	В выработках
17	БЗ-13	Сейсмоакустический мониторинг в выработках ПИЛ	В выработках

Эксперименты НИР в ПИЛ по направлениям: геодинамика, геомеханика и сейсмотектоника

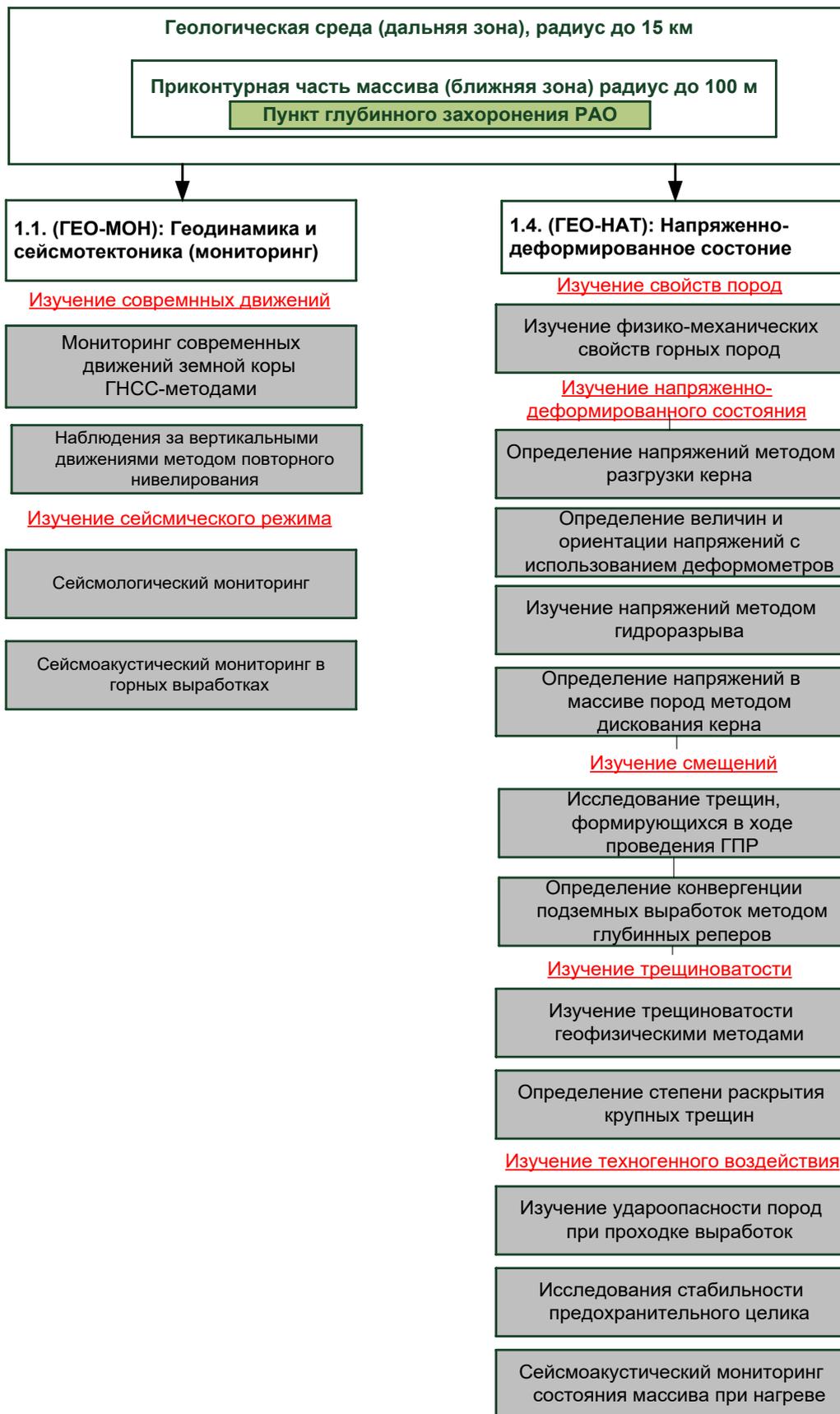


Рисунок 2.9 – Структура исследований и экспериментов в ПИЛ

### Список использованных источников

Докукин П. А., Кафтан В. И., Красноперов Р. И. Влияние формы треугольников в геодезической сети на результаты определения деформаций земной поверхности // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2010. № 5. С. 6–11.

Морозов В.Н., Маневич А.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) эпицентрального района землетрясения 13.03.1992  $M_s$  6,8 (Турция)// Геофизические исследования. 2017. №4.

Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Колесников И.Ю., Маневич А.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральной зоны сильного землетрясения в Иране (26 декабря, 2003 г.  $M_w$  6,6) // Физика Земли. 2018а. С. 68-78. DOI: 10.1134/S0002333718040087.

Морозов В.Н., Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Колесников И.Ю., Маневич А.И. Мельников А.Ю. Моделирование напряженно-деформированного состояния и результаты GPS-мониторинга эпицентральной зоны землетрясения 24 августа 2014,  $M$  6 (Нара, США) // Геотектоника. 2018б. № 5. С. 90 – 102.

Морозов В.Н., Маневич А.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральной зоны землетрясения 13.03.1992 ( $M = 6,9$ , Турция) // Геофизические исследования. 2018в. Т. 19. № 1. С. 17 - 29. DOI: 10.21455/gr2018.1-2.

Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И. Подземная исследовательская лаборатория: геодинамические и сеймотектонические аспекты безопасности // Радиоактивные отходы. 2018д. №3(4). С. 16 - 29.

Kaftan V., Melnikov A. Deformation precursors of large earthquakes derived from long term GNSS observation data// Russ. J. Earth Sci. 2016. DOI:10.2205/2016ES000568.

GPS Data (USGS Earthquake Hazards Program). URL: [https://earthquake.usgs.gov/monitoring/gps/Southern\\_California/velocities](https://earthquake.usgs.gov/monitoring/gps/Southern_California/velocities) (27.11.2018).

### **3. Усовершенствование методов хранения, систематизации, визуализации и распространения больших массивов геофизических данных**

**Номер регистрации в ИС Минобрнауки: 0145-2016-0005**

**Номер госрегистрации: ААА-А17-117012610076-8**

**Руководители: к.ф.-м.н. Н. А. Сергеева;**

**к.ф.-м.н. Э. О. Кедров;**

**к.г.-м.н. А. И. Рыбкина**

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

#### **3.1. Расширение информационных ресурсов Мировых центров данных**

Мировые центры данных по солнечно-земной физике (СЗФ) и физике твердой Земли (ФТЗ) являются регулярными членами Мировой системы данных (МСД) Международного совета по науке, осуществляют свою деятельность, руководствуясь Конституцией МСД и реализуя политику МСД в отношении данных, обеспечивают сбор, гарантированное долговременное хранение, распространение геофизических данных и решают задачи увеличения объемов качественных информационных ресурсов.

В МЦД по СЗФ 2018 г. дополнены представленные на веб-сайте [http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic\\_variations.ru.html](http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic_variations.ru.html) массивы среднечасовых и минутных значений элементов геомагнитного поля и *K*-индекса вновь поступившими данными от ряда обсерваторий. До публикации на сайте часть данных была переформатирована, часть переведена с бумажного носителя в текстовые файлы в кодах ASCII. Значительным вкладом в коллекцию Центра явились исторические данные геомагнитной обсерватории «Екатеринбург» за 1887–1925 гг. и данные обсерватории «Паратунка» за период 1998–2000 гг. Размещено в свободном доступе более 180 Гб цифровых изображений магнитограмм пяти обсерваторий. Добавлен большой массив данных о среднегодовых значениях элементов магнитного поля мировой сети из 231 обсерваторий за период 1846-2014 гг., подготавливаемый в ИЗМИРАН. Создана веб-страница доступа к этим данным с интерактивной google-картой, показывающей расположение обсерваторий, и основной информацией о каждой из них с указанием о наличии данных в Центре.

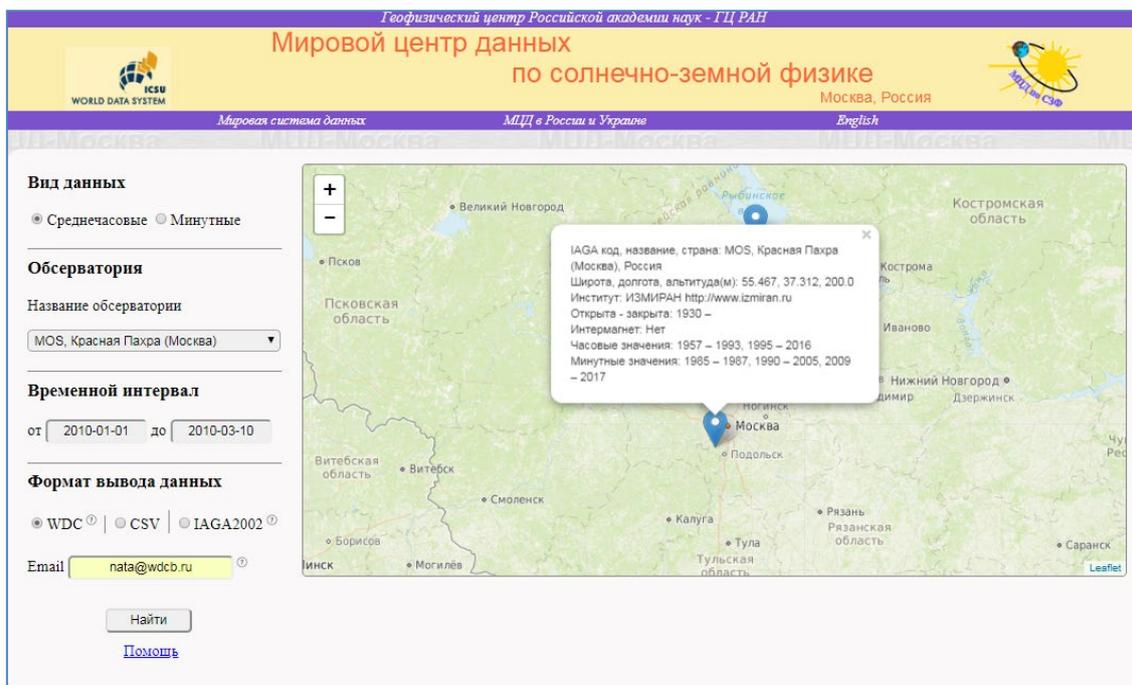
Новые данные ионосферной станции "Москва" (ИЗМИРАН) за период XI.2017–X.2018 гг. после проверки, анализа и переформатирования преобразованы в годовые файлы для каждого из 18 ионосферных параметров и опубликованы на веб-сайте [http://www.wdcb.ru/stp/ionosphere/ionospheric\\_phenomena.ru.html](http://www.wdcb.ru/stp/ionosphere/ionospheric_phenomena.ru.html). Здесь размещен каталог наличия в Центре копий (на фото пленке) аналоговых ионограмм 215 ионосферных станций мировой сети. Реорганизована веб-страница доступа к ионосферным данным: размещена интерактивная google-карта с расположением обсерваторий и основной информацией о каждой из них, позволяющая перейти к данным каждой обсерватории, находящимся на FTP-сервере.

Каталог солнечных вспышечных событий XXIV цикла солнечной активности в новой версии ноября 2018 г. размещен в разделе веб-сайта «Солнечная активность» [http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar\\_activity.ru.html](http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_activity.ru.html). Дополнены разделы «Солнечные пятна», «Секторная структура межпланетного магнитного поля», «Поток радиоизлучения Солнца с длиной волны 10,7 см». О работе с данными о солнечной активности представлены доклады на конференции в ИКИ РАН и международной конференции в Болгарии [*Сергеева и др.*, 2018; *Sergeyeva et al.*, 2018a].

В МЦД по ФТЗ в 2018 г. дополнены «Сейсмологический каталог» и «Сейсмологический бюллетень» за период XII.2016–I.2018 гг. данными, получаемыми из ГС РАН. Каталоги землетрясений регионов «Крым», «Карпаты», «Алтай и Саяны» и «Прибайкалье и Забайкалье», «Якутия» «Приморье» дополнены данными за 2011 г. (более 4 000 событий), опубликованными в ежегодниках «Землетрясения Северной Евразии».

В 2018 гг. продолжалось выполнение проекта «Сохранение старых данных» – преобразование данных с бумажного носителя в электронный вид с целью увеличения информационных ресурсов в электронном виде, обеспечения свободного on-line доступа к ним и более эффективного использования. Переведены в электронный вид данные четырех ионосферных станций (41 200 документов). После проверки и редактирования часть данных размещена на веб-сайте [http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere\\_3/](http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere_3/). Оцифрованы региональный каталог землетрясений Кавказа за период 1971–1986 гг. (23 658 событий) [*Панпалашвили*, 1973–1990] и результаты измерений модуля напряженности геомагнитного поля на советских спутниках «Космос 49» [*Орлов*, 1967] и «Космос 321» [*Долгинов и др.*, 1976].

Продолжалась работа по тестированию и усовершенствованию пользовательского интерфейса БД «Геомагнетизм» и веб-формы для формирования запроса на выборку данных по ряду условий (рис. 3.1). В БД внесена информация об обсерваториях.



**Рисунок 3.1 – Заполненная форма запроса на среднечасовые данные обсерватории «Москва» за период 2010.01.01-2010.03.10 в формате WDC. На интерактивной карте отображена выбранная обсерватория «Москва» и информация об обсерватории и наличии данных**

После предварительной проверки загружены данные среднечасовых значений <http://www.wdcb.ru/stp/geomagnetism/rantest/www/newmain.php>). Получены два свидетельства о государственной регистрации базы данных «Геомагнетизм – среднечасовые значения элементов геомагнитного поля» (№2018621676 от 26.10.2018 г.) и программы для ЭВМ «Геомагнитный сервис» (№2018663396 от 26.10.2018 г.).

### **3.2. БД сферических визуализаций по направлению геология нефти и газа**

В Геофизическом центре РАН накоплены большие объемы данных по наукам о Земле. Большой массив тектонических геоданных был адаптирован под сферический формат для визуализации с использованием цифрового демонстрационного комплекса со сферическим проекционным экраном. В ходе проведения работ текущего этапа на сферическом демонстрационном экране была визуализирована геопространственная база данных ROSA, включающая в себя информацию по крупнейшим месторождениям нефти и газа России и мира за 20 век. Главная цель проекта – проведение сравнительного аналитического исследования по становлению нефтегазовой отрасли на территории всего мира посредством сферической визуализации с использованием ПО «Орбус».

Одной из важнейших задач для достижения поставленной цели стало создание и наполнение базы данных геопространственными данными по месторождениям углеводородов. Первым шагом в решении данной задачи стала разработка концепции с

изучением предметной области: авторами было проработано около 300 открытых специализированных российских и зарубежных библиографических источников, в результате чего был составлен их полный перечень для верификации данных и дальнейшей работы с ними.

Был создан и систематизирован крупный массив данных месторождений, а также атрибутивные поля к нему, необходимые для последующих работ, в частности, проведения пространственного и объектно-ориентированного аналитического исследования. Так, созданная база данных является одним из ключевых элементов проекта, который может быть использован как самостоятельный научный продукт [Rybkina et al., 2018].

Следующим шагом на пути проведения работ по проекту стала визуализация базы данных на демонстрационном комплексе со сферическим экраном с применением разработанных методов визуализации. В результате, все месторождения были представлены в виде геопространственных объектов, отображенных на единой карте.

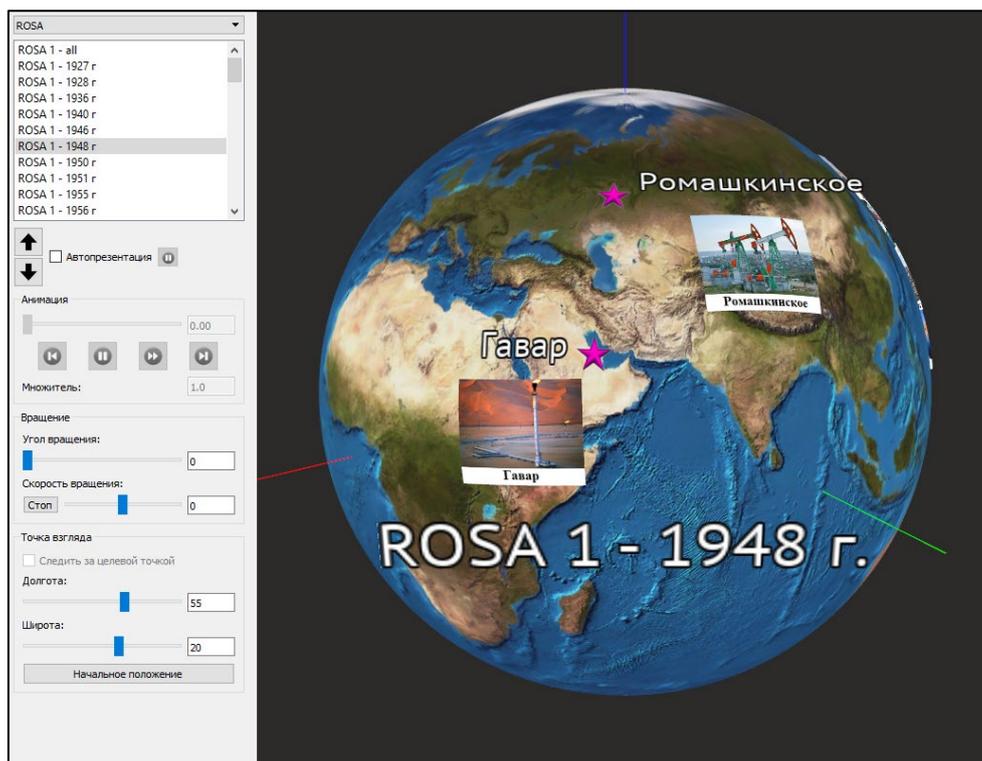
База данных по месторождениям нефти и газа, включает в себя порядка 60 слайдов, каждый из которых состоит из следующих элементов:

- Шейп-файл. Каждый шейп-файл содержит информацию только о тех месторождениях, которые были открыты в одном году. Также имеются слайды, содержащие информацию о всех месторождениях нефти и газа России и мира. Доступ к данным такого типа осуществляется напрямую через ПО «Орбус», поэтому отсутствует необходимость переводить данные в растровые изображения. Шейп-файлы хранятся в системе координат WGS\_84.

- Фотоснимки. При запуске слайда на сферическом экране появляется одна или несколько фотографий, каждая из которых соответствует конкретному элементу базы за данный промежуток времени (рис. 3.2). Также в свободной части экрана отображаются фотографии месторождений, открытых до рассматриваемого года.

- Фон в виде растрового изображения. В качестве фона для отображения данных выступает спутниковая карта мира. Соотношение сторон изображения составляет 2:1, а размеры 2048×1024.

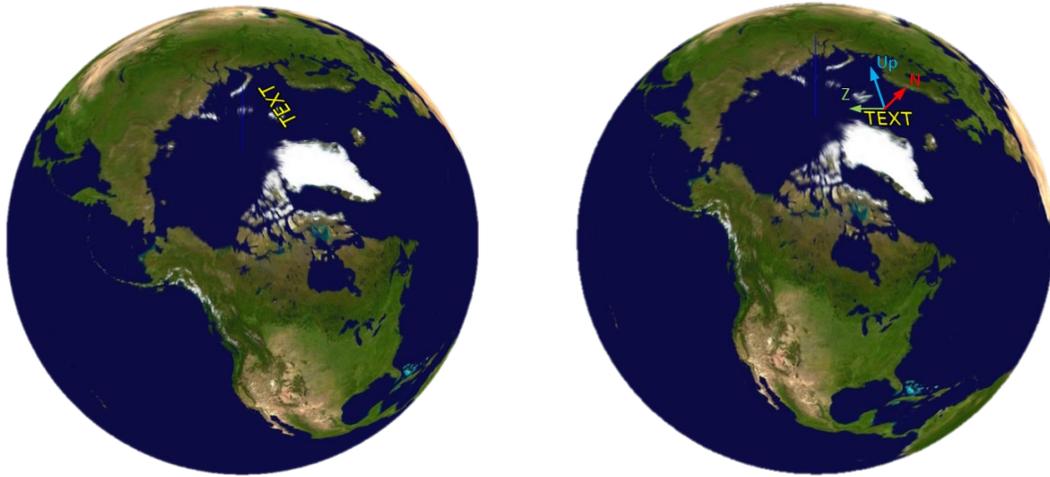
Экспорт слоев производился путем загрузки папки со слоями в базу данных ПО «Орбус» вручную, так как требовалась дополнительная обработка слайдов (добавление пояснительного текста, включая отображение названия месторождения и года открытия; привязка фотографии к месторождению), которую можно осуществить непосредственно во встроенном редакторе ПО.



**Рисунок 3.2 – Пример оформления слайда в ПО «Орбус»**

По алгоритму отображения карт на сферическом экране посредством ПО ORBUS:

ПО «Орбус» написано на языке C++. Для трехмерной визуализации используется графическая библиотека OpenGL, с графическим инструментарием OpenSceneGraph [<http://www.openscenegraph.org/>]. Для создания графического интерфейса пользователя используется Qt framework. Пользователь может вставлять на слайд собственные *текстовые подписи и иконки*. Эти объекты привязываются к точке обзора, чтобы при повороте камеры относительно поверхности не менялось их положение, либо статически привязываются к определенной точке на глобусе. Для улучшения читаемости надписи и иконки автоматически вращаются вместе с вращением камеры (рис. 3.3).



**Рисунок 3.3 – Текстовые надписи**

Для каждого слайда можно задать вращение с нужной скоростью, время до переключения на следующий слайд, а также центрировать необходимую область поверхности и увеличить ее.

Аналогично всем предыдущим визуализациям, созданным за время выполнения данной НИР, база данных геологии нефти и газа может быть транслирована непосредственно на цифровой демонстрационный комплекс со сферическим проекционным экраном либо загружена на веб-сервис для общего доступа.

### **3.3. Совершенствование управления данными, присвоение цифрового идентификатора объекта DOI базам и наборам данных**

В 2018 г. продолжалась работа по проекту «База данных по наукам о Земле» (БДНЗ), целью которого является создание современной системы регистрации и публикации геофизических данных с присвоением цифрового идентификатора объекта DOI, зарегистрированного в системе Crossref. Проект выполняется в свете решений и рекомендаций МСД, CODATA, Force 11, DataCite, Crossref и в сотрудничестве с другими организациями. Цель проекта – сделать геофизические данные более значимыми и доступными для научных исследований, облегчая исследователям поиск, идентификацию и цитирование данных.

Центральный репозиторий проекта (<http://esdb.wdcb.ru/>) является современным хранилищем большого объема геофизических данных. В 2018 году были опубликованы 10 наборов данных, 3 базы данных и одно приложение к статье, опубликованной в Russian Journal of Earth Sciences.

В 2018 г. веб-сайт БДНЗ был оснащен модулем поиска по метаданным, который даёт пользователям возможность поиска в пределах данного ресурса.

Для того, чтобы данные, опубликованные в БДНЗ, можно было найти через Google Data Search, а также для большей доступности данных в сети Интернет в целом, было принято решение оснащать страницы отклика структурированными данными, для этого стали снабжать HTML-код страниц отклика разметкой JASON-LD. Это специальный формат описания контента с помощью объектов словаря связанных данных (Linked Data, LD). Информация, оформленная таким образом, становится машиночитаемой, а значит доступной не только для поисковых роботов Google, но и другими поисковыми машинами, например, Яндекс.

О результатах работы был представлен доклад на Генеральной ассамблее Европейского геофизического союза (EGU), проходившей в Вене, Австрия, с 8 по 13 апреля 2018 г. [Sergeyeva et al., 2018b]

### 3.4. Оценка сейсмической опасности полуострова Камчатка

Задача распознавания мест возможного возникновения землетрясений и сегодня является актуальным направлением сейсмологии. В ГЦ РАН разработан новый подход FCAZ (Formalize Clustering And Zoning) [Гвишиани и др., 2016; Дзобоев и др., 2018; и др.] для определения потенциально высокосейсмичных территорий.

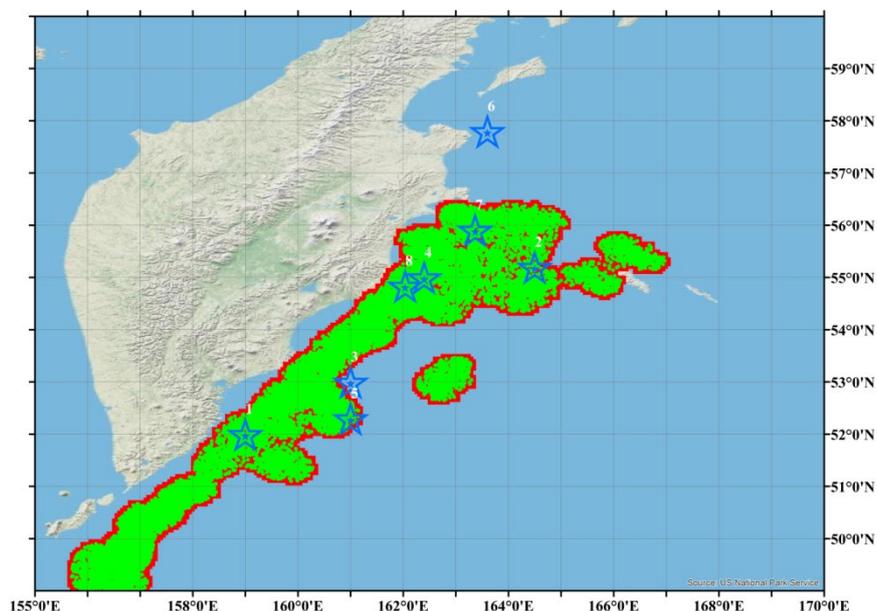
В 2017 г. для территории Камчатки с помощью FCAZ проведено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 7,75$  [Дзобоев и др., 2018]. В качестве объектов распознавания использовались эпицентры 44 113 землетрясений с магнитудой  $M_L \geq 3,5$  и глубиной гипоцентра не превосходящей 70 км за период 1962–2015 гг. [Камчатский...].

Опорная региональная магнитудная шкала  $M_L$  землетрясений Камчатки и Командорских островов [Камчатский...], в отличие от классических магнитудных шкал, не имеет самостоятельного характера [Абубакиров и др., 2018]. Она получается из значений энергетического класса Федотова [Федотов, 1972] пересчетом по формуле Гордеева [Гордеев и др., 2006]. Сегодня наиболее предпочтительной является шкала моментных магнитуд  $M_W$ , жестко связанная с сейсмическим моментом очага. Использование магнитуды  $M_W$  для региональных каталогов позволяет гарантировать их методическую выверенность. В работе [Абубакиров и др., 2018] авторами определена средняя связь моментной магнитуды  $M_W$  с камчатской региональной магнитудой  $M_L$  для диапазона  $M_W = 3,0–6,0$  (или  $M_L = 3,4–6,4$ ):  $M_W = M_L - 0,4$ . Исходя из этого принято решение для землетрясений Камчатки с  $M_L = 3,5–6,4$  пересчитать магнитуды  $M_L$  в  $M_W$ , произвести их сравнительный анализ с данными из каталогов USGS, ISC и EMSC, декластеризовать выверенный каталог и впервые применить декластеризованный каталог в качестве входных

данных системы FCAZ для оценки сейсмической опасности территории.

Выполнен сравнительный анализ данных из каталога [Камчатский...] ( $M_L = 3,5-6,4$ ) с данными каталогов USGS, ISC и EMSC, который позволил сделать вывод о полноте и согласованности сейсмологической информации для территории Камчатки. Для декластеризации пересчитанного по магнитудам каталога использовался подход Заляпина-Бен-Зиона. Декластеризованный каталог содержит 24 937 эпицентров землетрясений с  $M_W \geq 3,1$  ( $M_L \geq 3,5$ ) и  $h \leq 70$  км. Оценка полноты магнитуды  $M_c$  (completeness magnitude) показала, что пересчитанная магнитуда  $M_W = 3,1$  является представительной. В связи с этим, в качестве объектов распознавания системой FCAZ использовались эпицентры землетрясений с  $M_W \geq 3,1$ .

На рисунке 3.4 совокупностью зеленого и красного цветов показаны распознанные FCAZ-зоны. FCAZ-зоны хорошо согласуются с расположением эпицентров землетрясений с  $M \geq 7,75$ . Внутри распознанных FCAZ-зон попадает 7 из 8 (87,5%) землетрясений с  $M \geq 7,75$ . Следует отметить, что распознанные FCAZ-зоны содержат в себе 76,7% землетрясений с  $M_W \geq 4,0$  из числа имеющихся в рассматриваемом каталоге. При этом FCAZ-зоны занимают около 35% площади сейсмоактивных Курило-Камчатской и Алеутской дуг. Все это дает возможность с большой степенью достоверности интерпретировать распознанные FCAZ-зоны как зоны возможного возникновения землетрясений с магнитудой  $M \geq 7,75$  на Камчатке.



**Рисунок 3.4 – FCAZ-зоны возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 7,75$  на Камчатке и эпицентры землетрясений с  $M \geq 7,75$**

Как видно из рисунка 3.4, распознанные FCAZ-зоны хорошо согласуются с расположением эпицентров землетрясений с  $M \geq 7,75$ . Из 8 рассматриваемых сильнейших

землетрясений Камчатки эпицентр только одного (12,5%) не попал в распознанные FCAZ-зоны, создавая ошибку типа «пропуск цели». Это эпицентр Озерновского землетрясения с  $M = 7,75$ , произошедшего 22 ноября 1969 г. на севере рассматриваемого региона (№ 6 на рисунке 2.4). Ошибка типа «пропуск цели» Озерновского землетрясения связана с тем, что эпицентр этого землетрясения расположен вне современной зоны субдукции. Условия возникновения Озерновского землетрясения, находящегося вне зоны субдукции, кардинально отличаются от остальных рассматриваемых землетрясений.

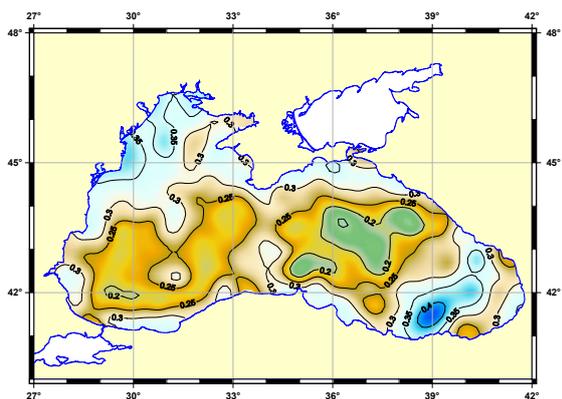
Довольно интересным оказался результат сравнительного анализа FCAZ-зон, распознанных с использованием в качестве объектов распознавания всех эпицентров с  $M_L \geq 3,5$  [Дзобоев и др., 2018] из каталога землетрясений Камчатки за период 1962–2015 гг. [Камчатский...] и эпицентров землетрясений из этого же, но уже декластеризованного каталога (рис. 2.4). Распознанные зоны оказались сильно похожими (почти совпадают). Это говорит о том, что для территории Камчатки наличие в каталоге форшоковых и афтершоковых последовательностей не влияет на результат распознавания системой FCAZ. В пользу этого говорит и тот факт, что вычисленные в автоматическом режиме оптимальные значения свободных параметров системы FCAZ [Гвишиани и др., 2016] для обоих распознаваний оказались очень близкими.

### **3.5. Исследование пространственных неоднородностей климатического изменения уровня Каспийского, Черного и Балтийского морей по данным спутниковой альтиметрии**

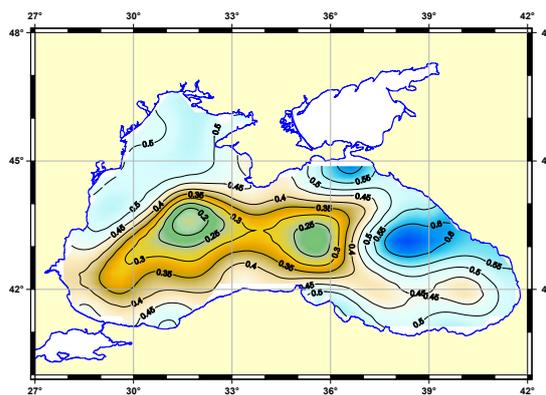
За период с 1993 по 2015 гг. по данным альтиметрических измерений спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3 межгодовая изменчивость уровня Черного моря характеризуется подъемом в 1993–1999, 2002–2005, 2008–2010 и 2012–2013 гг. и спадом его в 1999–2001, 2006–2007 и 2014–2015 гг. В среднем для 1993–2015 гг. характерен подъем уровня Черного моря со скоростью  $0,28 \pm 0,11$  см/год. Максимальный рост уровня более 0,4 см/год наблюдался на юго-восточной периферии Батумского квазистационарного антициклона. В области, ограниченной основным черноморским течением, скорость изменения уровня лежит в интервале от 0,2 до 0,25 см/год. Минимум 0,13 см/год наблюдается в области восточного циклонического круговорота. Вдоль побережья уровень моря изменяется в пределах от 0,3 до 0,35 см/год (рис. 3.5).

Анализ пространственной неоднородности скорости изменения уровня для каждого временного интервала моря позволяет выделить районы, в которых наблюдаются максимальные скорости изменения (падения или роста) уровня Черного моря (рис. 3.6). Наибольшая скорость подъема уровня Черного моря с большой вероятностью может

наблюдаться у побережья Крыма и Краснодарского края в районе Керченского пролива, а также вдоль побережья Республик Абхазия.



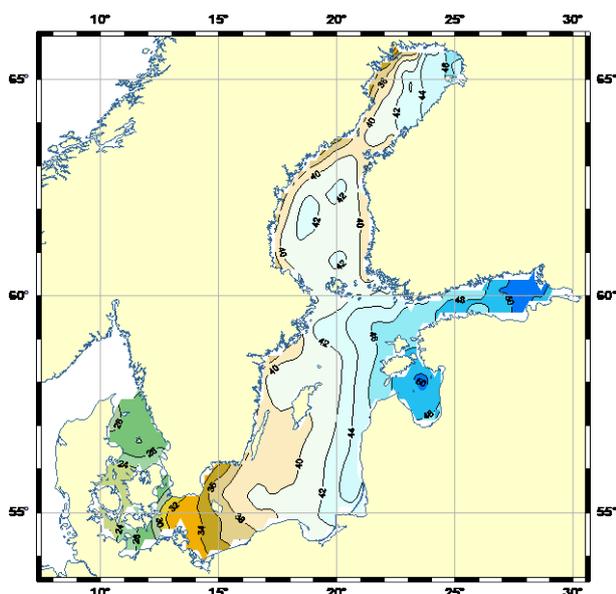
**Рисунок 3.5 – Пространственная изменчивость климатической скорости изменения уровня Черного моря (см/год) за период с 1993 по 2015 гг.**



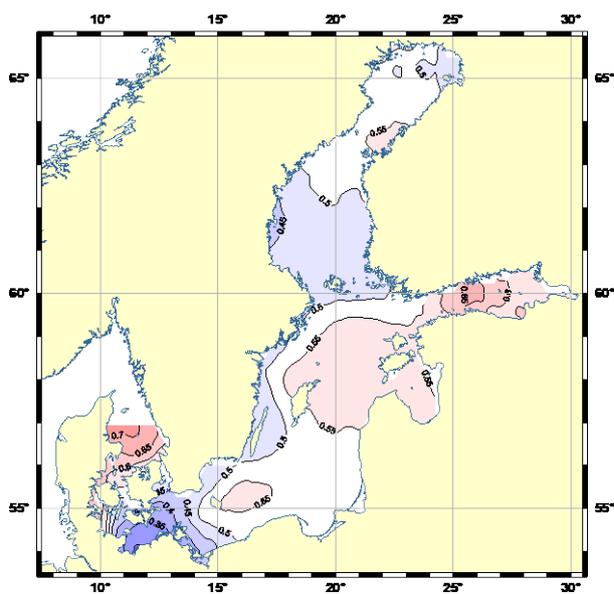
**Рисунок 3.6 – Нормированные скорости изменения уровня Черного моря по данным альтиметрических измерений за период с 1993 по 2015 гг.**

За временной период 1993–2016 гг. максимальные скорости межгодовой изменчивости уровня Балтийского моря (более 5 мм/год) наблюдаются в Ботническом заливе. По направлению к Датским проливам скорость уменьшается с 4,4 до 3,2 мм/год. В проливе Каттегат она становится более 3,6 мм/год (рис. 3.7). Как для любого внутреннего моря, уровень которого существенно зависит от речного стока, для Балтийского характерно наличие чередующихся периодов роста и падения. Анализ нормированных скоростей межгодовой изменчивости уровня Балтийского моря показывает, что вероятность максимальных скоростей подъема или падения уровня моря наблюдается в проливе Каттегат и у побережья Эстонии, а минимальных – на границе Датских проливов и центральной части моря и в Ботническом заливе (рис. 3.8).

С сентября 1992 г. по настоящее время изменчивость уровня Каспийского моря хорошо прослеживается по данным спутниковой альтиметрии (рис. 3.9). Результаты расчетов показали, что этот временной период можно разделить на шесть интервалов. С зимы 1992/1993 г. до лета 1995 г. наблюдался резкий рост уровня моря до отметки -26,4 м в балтийской системе высот со скоростью  $19,93 \pm 2,14$  см/год. Затем до зимы 1997/1998 г. наблюдалось очередное резкое понижение до отметки -27,1 м со скоростью  $22,17 \pm 2,45$  см/год. Умеренное падение продолжилось до зимы 2001/2002 г. до отметки -27,4 м со скоростью  $5,89 \pm 1,09$  см/год.



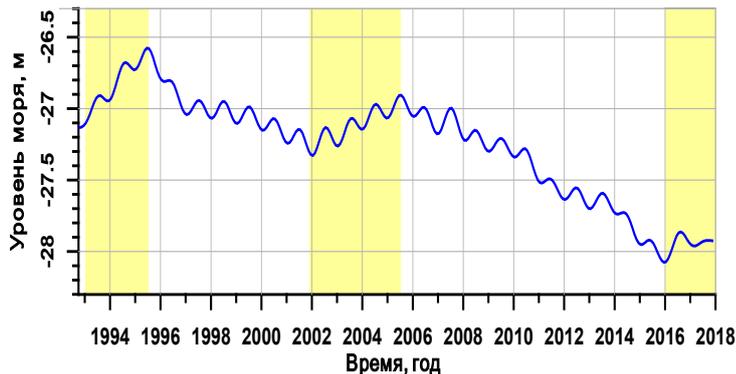
**Рисунок 3.7 – Пространственная изменчивость межгодовой скорости роста аномалий уровня Балтийского моря по данным альтиметрических измерений за период с 1993 по 2015 гг.**



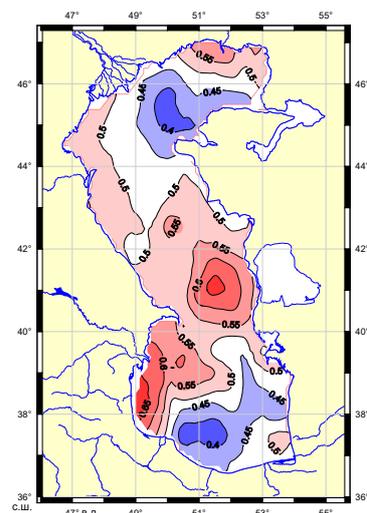
**Рисунок 3.8 – Нормированные скорости изменения уровня Балтийского моря по данным альтиметрических измерений за период с 1993 по 2015 гг.**

Последующий умеренный рост до отметки  $-26,7$  м со скоростью  $9,92 \pm 1,78$  см/год наблюдался до лета 2005 г. С лета 2005 г. по зиму 2009/2010 гг. уровень моря умеренно падал до отметки  $-27,3$  м со скоростью  $-8,45 \pm 1,23$  см/год. Это падение продолжилось и в 2010 г. В 2010–2012 гг. скорость падения уровня Каспия увеличилась до  $-15,23 \pm 1,73$  см/год; к марту 2013 г. уровень моря составил  $-27,6$  м. Падение уровня Каспия продолжилось до зимы 2016/2017, что отчетливо видно по спутниковым данным. Начиная с 2016 г. по конец 2017 г. уровень моря начал расти со скоростью  $3,22 \pm 1,27$  см/год и к июню 2016 г. составил  $-27,87$  м. Однако в июне 2017 г. он уменьшился до величины  $-27,93$  м, что не позволяет говорить об устойчивой тенденции к росту уровня Каспийского моря.

Анализ нормированных скоростей межгодовой изменчивости уровня Каспийского моря показывает (рис. 3.10), что вероятность максимальных скоростей подъема или падения уровня моря наблюдается в районе дельты реки Урал, в районе юго-восточнее Дербентской впадины и севернее Апшеронского порога и в районе побережья Азербайджана западнее Ленкоранской впадины.



**Рисунок 3.9 – Временная изменчивость уровня Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии с января 1993 г. по декабрь 2017 г. Периоды роста уровня выделены желтым цветом.**



**Рисунок 3.10 – Нормированные скорости изменения уровня Каспийского моря по данным альтиметрических за период с 1993 по 2015 гг.**

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

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

Журнал RJES публикует оригинальные научно-исследовательские работы по всем направлениям геологии, геофизики и геохимии, включая геоинформатику, экологию, физику атмосферы и океана. Журнал публикуется на английском языке. Статьи, представленные для публикации, подвергаются стандартному процессу "слепого" рецензирования и экспертной оценки, все статьи подвергаются редакционной обработке. RJES включен в ядро Web of Science (Core Collection) в рамках коллекции Emerging Sources Citation Index (ESCI), также индексируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ) (импакт-фактор 0,760), перечне ВАК и Crossref (каждая опубликованная в журнале статья имеет идентификатор DOI). В 2018 году, благодаря усилиям редакционно-издательской группы ГЦ РАН, журнал начал индексироваться библиографической базой данных SCOPUS.

Статьи публикуются в формате высокого разрешения PDF с гиперссылками к внутренним и внешним объектам. Онлайн-версия журнала является первичной. Стиль

журнала полностью совместим со стандартными научными изданиями. Журнал публикует также интерактивные научные материалы, т.е. Flash и HTML5 презентации лекций и докладов, которые включают в себя видео материалы с синхронизированными слайдами, переходами, указателями и другими динамическими и интерактивными инструментами.

Веб-сайт журнала поддерживает английский и русский языки. На веб-сайте размещена вся необходимая информация (рис. 3.11), такая как, профиль журнала, список редакционной коллегии, публикационная этика, принятая издателем, идентификационные данные журнала, рекомендации авторам по оформлению статей для представления в журнал.

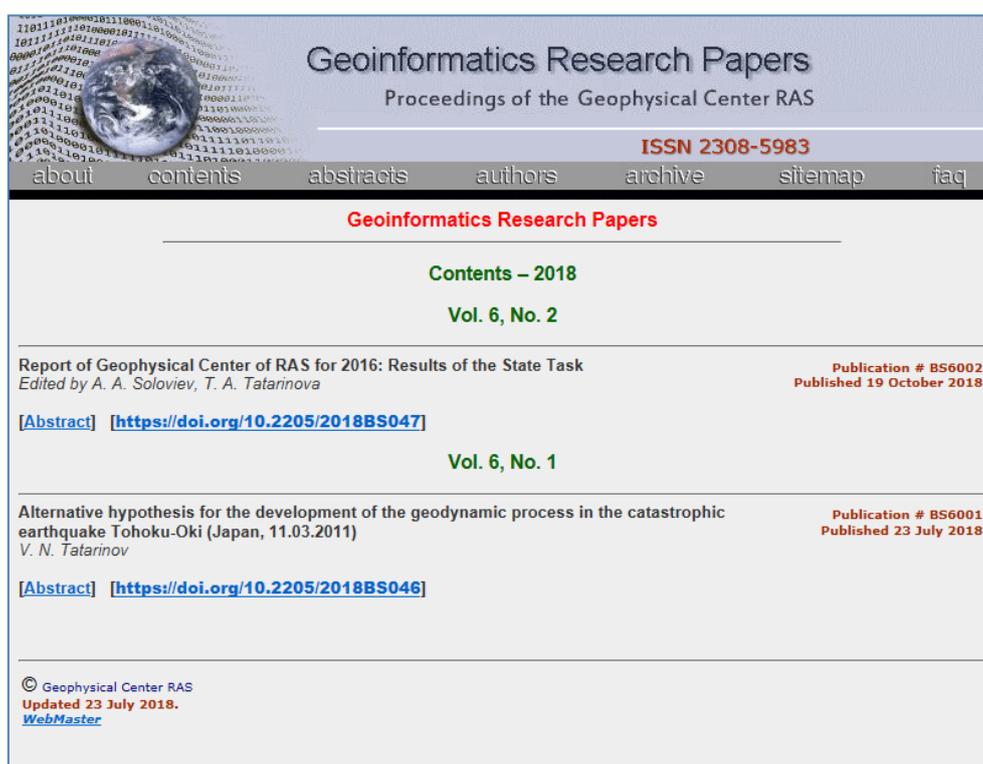
**Рисунок 3.11 – Веб-страница журнала RJES с одной из последних опубликованных статей**

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

технических проектов, материалы о международном сотрудничестве институтов.

Серийное электронное издание «Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН» («Geoinformatics Research Papers. Proceedings of the Geophysical Center RAS») было учреждено ГЦ РАН для публикации научных статей, тематика которых связана с информационными технологиями, внедренными в науки о Земле, научных отчетов, тезисов конференций, инструкций и т.д.

Согласно намеченному плану в 2018 году была создана и введена в эксплуатацию новая версия веб-сайта серийного электронного издания «Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН» («Geoinformatics Research Papers. Proceedings of the Geophysical Center RAS») (<http://ebooks.wdcb.ru/>) (рис. 3.11).



**Рисунок 3.12 – Веб-страница электронного издания «Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН» с содержанием 2018 г.**

В 2018 г. опубликовано:

- в 18 выпуске журнала «Russian Journal of Earth Sciences» – 6 номеров (30 статей);
- в журнале «Вестник ОНЗ РАН» – 220 новостных сообщений, 7 научных статей;
- в серийном издании «Исследования по геоинформатике. Труды ГЦ РАН» – 1 отчет, 1 научная статья.

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

Национальный геофизический комитет Российской академии наук (НГК РАН) осуществляет представительство России в Международном геодезическом и геофизическом союзе (IUGG) и его восьми ассоциациях. Комитет ведет свою деятельность

под руководством Бюро Отделения наук о Земле РАН. Базовой организацией НГК РАН является Геофизический центр РАН.

В 2018 г. секции НГК РАН приступили к подготовке участия в 27-й Генеральной ассамблее IUGG, которая прошла 8–19 июля 2019 года в г. Монреале, Канада (<http://www.iugg2019montreal.com/>). Члены секций НГК РАН назначены конвенерами ряда научных сессий в рамках программы Ассамблеи. В 2018 г. члены секции геомагнетизма и аэрономии приняли активное участие в развертывании новой магнитной обсерватории на базе Беломорской биологической станции им. Н.А. Перцова Биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

### Список использованных источников

Абубакиров И.Р., А.А. Гусев, Е.М. Гусева, В.М. Павлов, А.А. Скоркина (2018) Массовое определение моментных магнитуд  $M_w$  и установление связи между  $M_w$  и  $M_L$  для умеренных и слабых камчатских землетрясений, Физика Земли, № 1, сс. 158–172, doi: 10.7868/S0002333718010039.

Гвишиани А.Д., Б.А. Дзобоев, С.М. Агаян (2016) Интеллектуальная система распознавания FCAZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа, Физика Земли, № 4, сс. 3–23, doi: 10.7868/S0002333716040013.

Гордеев Е.И., А.А. Гусев, В.И. Левина, В.Л. Леонов, В.Н. Чебров (2006) Мелкофокусные землетрясения п-ова Камчатка, Вулканология и сейсмология, № 3, сс. 28–38.

Дзобоев Б.А., С.М. Агаян, Ю.И. Жарких, Р.И. Красноперов, Ю.В. Барыкина (2018) Зоны возможного возникновения эпицентров сильнейших землетрясений Камчатки, Физика Земли, № 2, сс. 96–103, doi: 10.7868/S0002333718020084.

Долгинов Ш.Ш., А.Н. Козлов, В.И. Колесова и др. (1976) Каталог измеренных и вычисленных значений модуля напряженности геомагнитного поля вдоль орбит спутника "Космос-321". /20 января–13 марта 1970 г./. (ИЗМИР АН СССР, Институт космических исследований АН СССР), М.: Наука.

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

Орлов В.П. (ред.). (1967) Каталог измеренных и вычисленных значений модуля напряженности геомагнитного поля вдоль орбит спутника "Космос-49". 24 октября–4 ноября 1964 г. Части I, II, III. ИЗМИР АН СССР, М.

Папалашвили В.Г. (1973–1990) Сейсмологический бюллетень Кавказа (ежегодники 1971–1986 гг.). Тбилиси: Мецниереба.

Сергеева Н.А., Л.П. Забаринская, В.Н. Ишков, Т.А. Крылова (2018) *Результаты наблюдений солнечной активности в Мировом центре данных по солнечно-земной физике. Тезисы докладов*. Тринадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 12–16 февраля 2018 г., ИКИ РАН. С. 331.

Федотов С.А. (1972) Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд, М.: Наука, 117 с.

Rybkina A.I., A.A. Odintsova, A.D. Gvishiani, O.O. Samokhina, A.A. Astapenkova (2018) Development of geospatial database on hydrocarbon extraction methods in the 20th century for large and super large oil and gas deposits in Russia and other countries. *Russian Journal of Earth Sciences*. V. 6. ES6002. doi:10.2205/2016ES000584.

Sergeyeva N., V. Ishkov., L. Zabarinskaya (2018a) Data on Solar Activity and Interplanetary Medium in WDC for STP. Book of abstracts. Tenth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere” Primorsko, Bulgaria, June 4–8, 2018. Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences. P. 4. DOI: 10.31401/WSoz.2018.abs.

Sergeyeva N.A., L.P. Zabarinskaya (2018b) Activity of DOI-minting to Geomagnetic Data in Russia. EGU General Assembly 2018. *Geophysical Research Abstracts*. V. 20, EGU2018-14125.

#### **4. Развитие методов и алгоритмов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений для оценки сейсмической опасности**

**Номер регистрации в ИС Минобрнауки: 0145-2018-0001**

**Номер госрегистрации: АААА-А18-118021990130-1**

**Руководитель: к.ф.-м.н. Дзедобоев Б.А.**

**Ответственный исполнитель: к.ф.-м.н. Дзедобоев Б.А.**

Настоящий отчет является заключительным по теме: «Развитие методов и алгоритмов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений для оценки сейсмической опасности». Исследование направлено на создание новых и развитие разработанных ранее методов и алгоритмов искусственного интеллекта для оценки сейсмической опасности территорий путем их сведения в единую, унифицированную среду, реализующую системный подход к изучению сейсмической опасности.

В 2018 г. исследовательские работы по проекту велись по двум основным направлениям:

- распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии с помощью модифицированной версии алгоритмической системы FCAZ;
- создание специализированной базы данных по оценкам сейсмической опасности территории и многофункционального пользовательского интерфейса для работы с ней с целью проведения комплексной, многокритериальной оценки сейсмической опасности.

##### **4.1.1. Распознавание мест возможного возникновения сильных ( $M \geq 6,5$ ) землетрясений в Калифорнии**

В 1976 г. советско-американской группой ученых было выполнено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6,5$  в Калифорнии классическим методом ЕРА [Гвишиани и др., 1988; Соловьев и др., 2014]. В качестве объектов распознавания использовались пересечения морфоструктурных линейментов [Алексеевская и др., 1977].

В работах [Гвишиани и др., 2013а; Gvishiani et al., 2013] распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии было проведено с

помощью кластеризационного алгоритма DPS (Discrete Perfect Sets) [Agayan et al., 2014]. Здесь в качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений из двух каталогов: каталога Центра данных о землетрясениях Северной Калифорнии (NCEDC) и каталога Центра данных по землетрясениям в Южной Калифорнии (SCEDC).

Позднее, создание алгоритма E<sup>2</sup>XТ [Гвишиани и др., 2013б] позволило авторам говорить о разработке алгоритмической системы FCAZ (Formalized Clustering And Zoning) [Гвишиани и др., 2013б], позволяющей проводить распознавание высокосейсмичных территорий методом, отличным от классического подхода ЕРА [Гвишиани и др., 1988; Соловьев и др., 2014]. Подробное описание системы FCAZ приведено в работе [Гвишиани и др., 2013б]. В работе [Дзедоев, 2014] система FCAZ использовалась для распознавания мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6,5$  в Калифорнии. В качестве объектов распознавания использовались эпицентры землетрясений из каталога ANSS [<http://www.ncedc.org/anss/catalog-search.html>]. Позже система FCAZ была модифицирована путем создания блоков искусственного интеллекта в структуре алгоритмов DPS и E<sup>2</sup>XТ. Модифицированная версия системы получила название FCAZm (соответственно DPSm и E<sup>2</sup>XТm) [Гвишиани и др., 2016].

Целью настоящего исследования являлось проведение распознавания мест возможного возникновения землетрясений с магнитудой  $M \geq 6,5$  в Калифорнии с помощью модифицированной версии FCAZm алгоритмической системы FCAZ.

#### **4.1.2. Объекты распознавания и сильные землетрясения в Калифорнии**

В работе использовался каталог ANSS землетрясений в Калифорнии в пределах 31°–42° с.ш., 114°–126° з.д. в интервале времени 01.01.1960–31.12.2012 гг. Каталог землетрясений с  $M \geq 6,5$  в Калифорнии был сформирован на основе каталога землетрясений, используемых для обучения алгоритма «Подклассы» при распознавании в Калифорнии методом ЕРА [Гельфанд и др., 1976], и рассматриваемого каталога ANSS.

Для того, чтобы выбрать нижний порог магнитуды землетрясений, начиная с которого эпицентры будут использоваться в качестве объектов распознавания, была проведена оценка полноты магнитуды  $M_c$  (completeness magnitude) рассматриваемого каталога. Было принято решение использовать в качестве объектов распознавания эпицентры землетрясений с  $M \geq 3,0$ .

#### **4.1.3. FCAZm-распознавание**

К множеству объектов распознавания был применен алгоритм DPSm. Было выполнено 3 итерации алгоритма. DPSm-кластеризация эпицентров землетрясений осуществлялась с использованием разработанного критерия выбора уровня

максимальности плотности [Гвишиани и др., 2016]. В распознанные DPSm-кластеры вошло 75% рассматриваемых объектов распознавания (эпицентров землетрясений с  $M \geq 3,0$ ).

К распознанным DPSm-кластерам был применен модифицированный алгоритм  $E^2XTm$ . Оптимальные значения входных параметров алгоритма подбирались автоматически с помощью блока искусственного интеллекта [Гвишиани и др., 2016]. Сформированные таким образом FCAZm-зоны показаны на рисунке 4.1. Внутри FCAZm-зон попадает 28 из 33 (85%) землетрясений с  $M \geq 6,5$ . Отметим, что FCAZm-зоны содержат в себе 83% землетрясений с  $M \geq 4,5$  из числа имеющихся в рассматриваемом инструментальном каталоге. При этом распознанные зоны занимают не значительную площадь сейсмоопасной части Калифорнии. Все это дает возможность с большой степенью достоверности интерпретировать полученные FCAZm-зоны как зоны возможного возникновения землетрясений с магнитудой  $M \geq 6,5$  в Калифорнии.

Распознанные FCAZm-зоны достаточно хорошо согласуются с расположением эпицентров землетрясений с  $M \geq 6,5$ . Эпицентры практически всех сильных землетрясений региона попадают внутрь зон или находятся на достаточно близком расстоянии от них (по сути, располагаются на границе зон).

Из 33 рассматриваемых сильных землетрясений эпицентры только 5 (15%) не попали в распознанные зоны. При этом надо заметить, что три эпицентра (№ 17, 18 и 31 на рисунке 4.1), расположенные на северо-западе региона, находятся в акватории Тихого Океана на достаточно большом (особенно, № 17 и 31) расстоянии от берега. Так же во FCAZm-зоны не попали два эпицентра исторических землетрясений. Это землетрясение у Форт-Техона, произошедшее в 1857 г. (№ 4) с  $M > 7,0$ , и землетрясение в Сан-Франциско 18 апреля 1906 г. (№ 5) с  $M = 8,25$ . Эти землетрясения произошли задолго до начала инструментальных наблюдений за сейсмичностью Калифорнии. Поэтому мы не имеем достаточного числа объектов (эпицентров землетрясений с  $M \geq 3,0$ ) для их распознавания. Таким образом, если исключить из рассмотрения перечисленные землетрясения, то мы придем к тому, что, по сути, в выполненном для Калифорнии распознавании мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6,5$  отсутствуют ошибки типа «пропуск цели».

После 2012 г. в рассматриваемом регионе Калифорнии произошло одно землетрясение с  $M \geq 6,5$ . Это землетрясение 10 марта 2014 г. с  $M = 6,8$ . Его эпицентр расположен на северо-западе региона в акватории Тихого Океана внутри FCAZm-зоны. Тем самым результат чистого экзамена является успешным.

#### **4.1.4. Обоснование достоверности FCAZm-распознавания**

Аналогично предыдущим работам [Гвишиани и др., 2013б; 2016; Дзедоев, 2014] для обоснования достоверности результатов распознавания мест возможного возникновения

сильных землетрясений в Калифорнии были проведены контрольные эксперименты «индивидуальная сейсмическая история» и «полная сейсмическая история». Подробное описание экспериментов приведено в работе [Гвишани и др., 2016]. Здесь же мы остановимся только на описании результатов экспериментов.

Эксперименту «индивидуальная сейсмическая история» подверглись 9 землетрясений с  $M \geq 6,5$ . При распознавании в эксперименте использовался единый для всех 9 случаев набор значений свободных параметров алгоритмов DPSm и E<sup>2</sup>XТm. Были взяты те же значения свободных параметров, что и при обработке всего каталога. Результаты эксперимента показали, что в Калифорнии пространственное распределение распознанных в девяти экспериментах высокосейсмичных FCAZm-зон, хотя и различно, но подобно. При этом подвергнутые эксперименту землетрясения с  $M \geq 6,5$  оказались внутри распознанных FCAZm-зон, либо на их границах. Сравнение основных FCAZm-зон и результатов 9 контрольных экспериментов «индивидуальная сейсмическая история» показало их достаточную близость. Это обстоятельство дает существенный аргумент в пользу достоверности FCAZm-распознавания как варианта распознавания мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6,5$  в Калифорнии.

Было выполнено два эксперимента «полная сейсмическая история». Использовались объекты распознавания (эпицентры землетрясений с  $M \geq 3,0$ ) за следующие временные периоды: 1960–1990 гг. и 1960–2000 гг. Сравнение основного результата распознавания и полученных в эксперименте зон показало, что их пространственное расположение хотя и различно, но достаточно подобно. В Калифорнии после 1990 г. и 2000 г. произошло 11 и 4 землетрясения с  $M \geq 6,5$  соответственно. За исключением расположенного в акватории Тихого Океана на большом расстоянии от побережья Калифорнии эпицентра землетрясения 15 июня 2005 г. все эпицентры землетрясений, произошедших после 1990 г. и 2000 г., находятся внутри соответствующих зон FCAZm, хотя информация о них никак не использовалась при распознавании. То есть, внутрь распознанных FCAZm-зон попали эпицентры землетрясений произошедших спустя годы (в частности, спустя 10–20 лет) после даты последнего объекта распознавания (эпицентра землетрясения с  $M \geq 3,0$ ). Эпицентры землетрясений, произошедших до 1990 г. и 2000 г., неплохо согласуются с пространственным расположением соответствующих FCAZm-зон.

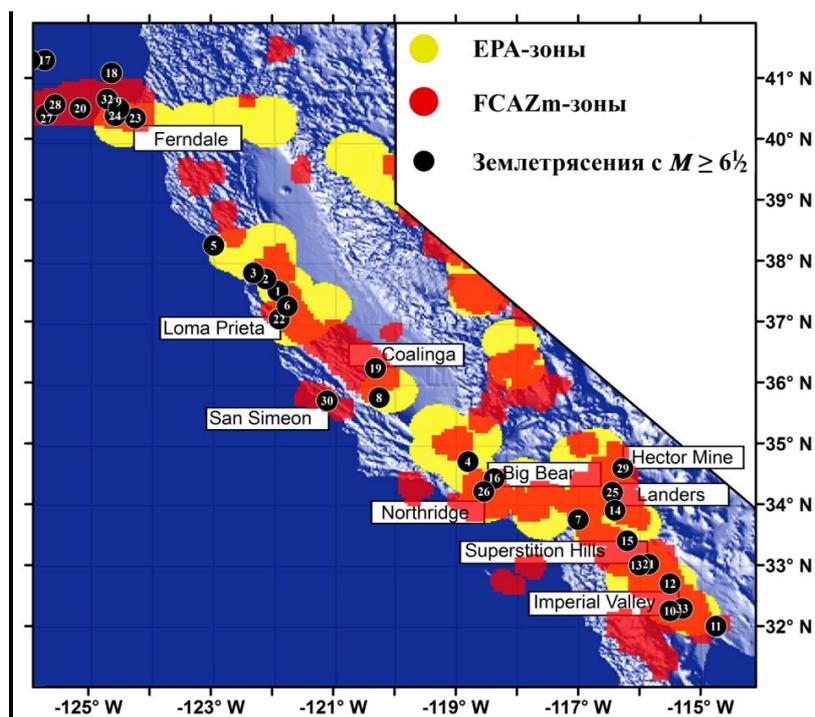
Проведено сравнение FCAZm-зон с зонами, распознанными ранее методом ЕРА [Гельфанд и др., 1976] и системой FCAZ [Дзобоев, 2014] в ее первоначальном виде.

Сравнение зон возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6,5$  в Калифорнии, распознанных алгоритмической системой FCAZm и методом ЕРА, приведено на рисунке 4.1. Видно, что FCAZm-зоны, полученные кластеризацией эпицентров

землетрясений и последующим их оконтуриванием, занимают меньшую площадь, чем зоны ЕРА. На территории рассматриваемого нами региона Калифорнии площадь FCAZm-зон оказывается в 2 раза меньше площади ЕРА-зон, а площадь DPSm-кластеров меньше площади зон ЕРА в 3,5 раза. При этом по большей части FCAZm-зоны находятся внутри зон ЕРА.

Внутри FCAZm-зон находится эпицентр землетрясения вблизи г. Сан-Симеон 22 декабря 2003 г. с магнитудой  $M = 6,5$  (№ 30), не попавший в зоны, распознанные методом ЕРА в работе [Гельфанд и др., 1976] (рис. 4.1). В левом верхнем углу карты внутри FCAZm-зон находятся эпицентры трех морских землетрясений, тоже не вошедшие в зоны, распознанные как высокосейсмичные методом ЕРА.

Таким образом, мы можем утверждать, что на территории Калифорнии зоны, распознанные системой FCAZm, занимают меньшую площадь и лучше согласуются с эпицентрами землетрясений с  $M \geq 6,5$ , чем зоны распознанные методом ЕРА. Следовательно, можно предположить, что в карте работы [Гельфанд и др., 1976] имеют место ложные тревоги.



**Рисунок 4.1 – FCAZm-зоны в Калифорнии и их сравнение с зонами, распознанными методом ЕРА**

Сравнение зон возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии, распознанных алгоритмическими системами FCAZm и FCAZ показало, что на

рассматриваемой территории площадь FCAZm-зон в 1,43 раза больше площади FCAZ-зон. Отношение площади пересечения зон FCAZm и FCAZ к площади их объединения равно 0,57. При этом по большей части FCAZ-зоны находятся внутри FCAZm-зон.

Приведенные результаты говорят о высокой достоверности интерпретации FCAZm-зон как зон возможного возникновения сильных ( $M \geq 6,5$ ) землетрясений в Калифорнии. Они хорошо согласуются с классическими высокосейсмичными зонами ЕРА [Гельфанд и др., 1976] и уточняют их, делая более информативными.

#### **4.2.2. ГИС-ориентированная база данных по оценке сейсмической опасности**

За последние несколько лет в Геофизическом центре РАН в рамках реализации ряда научных проектов по оценке сейсмической опасности Кавказа и Крыма были существенно развиты подходы к оценке сейсмической опасности на базе принципов распознавания образов и системного анализа. Они включают в себя как результаты развития классических методов, разработанных еще в 70-х годах прошлого столетия, так и принципиально новые методы системного анализа и соответствующие алгоритмические системы. Для всестороннего анализа полученных в проектах результатов в рамках настоящего исследования было выполнено их сведение в единую, унифицированную среду, реализующую системный подход к изучению рассматриваемых геоданных.

Цели создания системы и лежащей в ее основе базы геопространственных данных (далее БД) включают:

- наличие единой среды для подготовки, отображения и анализа результатов по распознаванию мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений;
- обеспечение системного анализа геоданных;
- развитие интеллектуальных многофункциональных геоинформационных систем;
- возможность проведения комплексной оценки сейсмической опасности по результатам независимых алгоритмов распознавания;
- минимизация последствий землетрясений в сейсмоопасных регионах.

Разработка ГИС состояла из нескольких этапов:

- сбор и перевод в ГИС-формат точечных, линейных и растровых исходных данных;
- создание единой БД для хранения исходных данных и результатов их комплексной обработки;
- реализация многофункционального пользовательского интерфейса для возможности многокритериальных запросов к БД в среде ГИС, обеспечивающего

многофакторную оценку сейсмической опасности для заданного пользователем региона.

Полученный результат является первым приближением в создании интеллектуальной системы принятия решений в области оценки сейсмической опасности и рисков для широкого круга пользователей. Этот круг включает в себя как ученых, так и лиц, принимающих решения, и соответствующие службы в сейсмоопасных регионах. Такая система создается впервые и не имеет аналогов. В финальной реализации система будет иметь некоторое сходство с навигационным приложением «Яндекс.Навигатор», предназначенным для оптимальной прокладки автомобильных маршрутов с учетом текущей загруженности автомагистралей.

#### 4.3.1 Исходная информация

Исходная информация, составляющая основу созданной ГИС, включает следующий набор цифровых тематических слоев геоданных:

- 1) географическая основа региона;
- 2) города и населенные пункты;
- 3) калиброванный каталог землетрясений региона;
- 4) результаты морфоструктурного районирования (МСР) [Горшков, 2010] (примеры схем МСР показаны на рисунке 4.2);
- 5) спутниковые снимки регионов, требуемые для построения схем МСР;
- 6) результаты распознавания ЕРА (Earthquake Prone Areas) – зон возможного возникновения сильных землетрясений, полученных с помощью обучения по двум классам [Гвишиани и др., 1988];
- 7) вспомогательные слои геолого-геофизических данных, используемых при расчете характеристик объектов для выполнения ЕРА-распознавания;
- 8) результаты распознавания зон возможного возникновения сильных землетрясений алгоритмом «Барьер» [Гвишиани и др., 2017] с помощью обучения по одному высокосейсмичному классу;
- 9) результаты определения высокосейсмичных зон с помощью системы FCAZ [Гвишиани и др., 2013б];
- 10) значения коэффициентов Общего закона подобия землетрясений:
  - в узлах регулярной сетки,
  - в пересечениях морфоструктурных линеаментов;
- 11) результаты моделирования динамики блоковой структуры и сейсмичности [Ismail-Zadeh et al., 2007]:

- схема блоковой структуры,
- каталог искусственных землетрясений.



(а)



(б)

**Рисунок 4.2 – Схемы МСР, построенные для горной области Крыма (а) и Кавказа (б)**

#### 4.3.2. Пользовательский интерфейс

Разработанная ГИС предоставляет пользователю широкие возможности по интерактивной работе с указанными данными. Прежде всего, пользователь имеет возможность выбрать интересующий его регион одним из следующих способов:

- выбор страны;
- указание административно-территориальной единицы для заданной страны (область, край, ...);
- очерчивание мышкой произвольного региона на карте;
- указание квадрата с заданной длиной стороны;
- указание круга с заданным радиусом и др.

Ниже приведен список возможных пользовательских запросов к БД для заданной области, реализованных в рамках созданной системы:

- эпицентры землетрясений с магнитудами из заданного диапазона (пример показан на рисунке 4.3);
- линеаменты, попадающие в область, с указанием их рангов;
- распознанные мест возможного возникновения сильных землетрясений из множества морфоструктурных узлов согласно методу ЕРА (пример показан на рисунке 4.4);

- распознанные мест возможного возникновения сильных землетрясений из множества морфоструктурных узлов согласно алгоритму «Барьер»;
- высокосейсмичные 2D-зоны, определенные с помощью системы FCAZ;
- эпицентры искусственных землетрясений с магнитудами из заданного диапазона, принадлежащие области;
- максимальная магнитуда землетрясений, ожидаемых в области с вероятностью  $p$  в течение  $N$  лет (пример показан на рисунке 4.5).

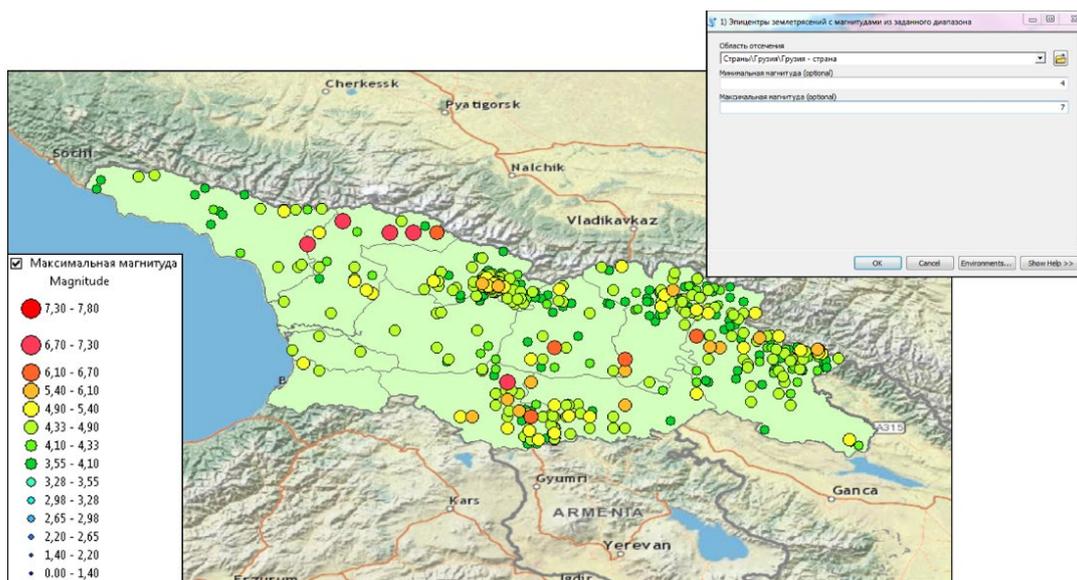


Рисунок 4.3 – Пример запроса эпицентров землетрясений из калиброванного каталога на территории Грузии с магнитудами 4–7

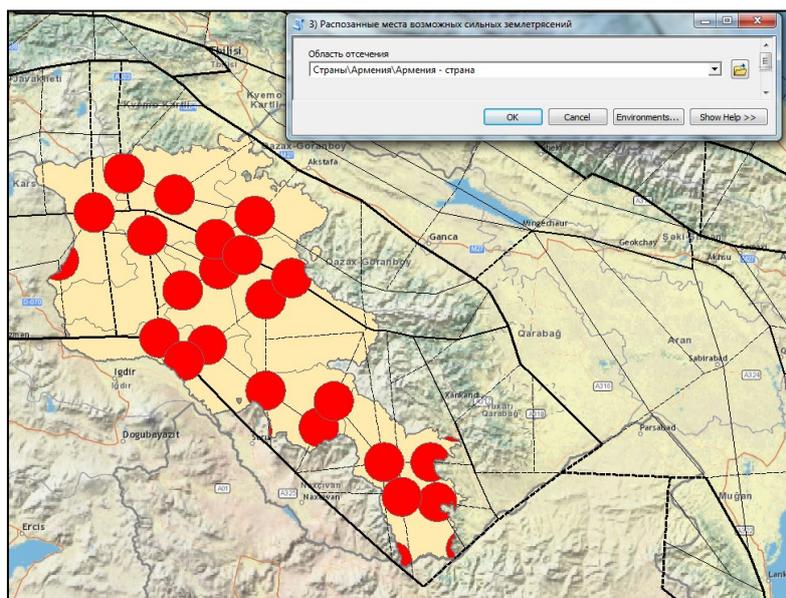
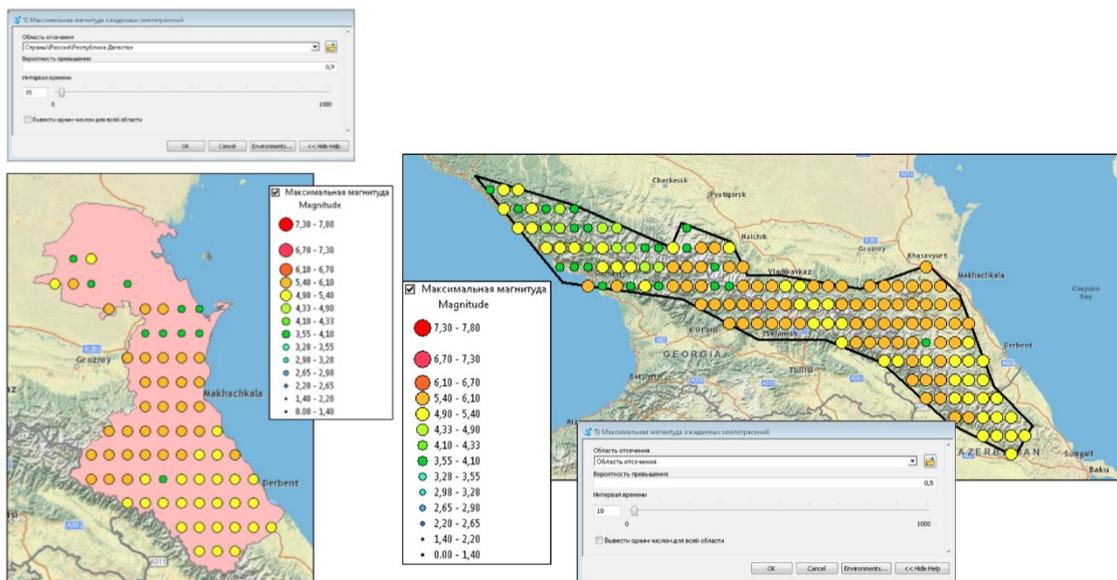


Рисунок 4.4 – Результат запроса высокосейсмичных пересечений морфоструктурных линеаментов на территории Армении согласно методу ЕРА [Соловьев и др., 2016]



(а)

(б)

**Рисунок 4.5 – Результат расчета максимальных магнитуд землетрясений с использованием ОЗПЗ [Parvez et al., 2014], ожидаемых в республике Дагестан в течение 15 лет с вероятностью 90% (а) и в произвольно заданной области (черный контур) в течение 10 лет с вероятностью 50% (б)**

## Заключение

В рамках настоящего НИР в единой ГИС-среде собрана наиболее полная информация, как по исходным данным, так и по результатам их обработки, позволяющим осуществлять многокритериальную оценку сейсмической опасности в сейсмоактивных регионах Российской Федерации и сопредельных государств. На сегодня созданная ГИС и лежащая в ее основе БД полностью реализованы для региона Кавказ-Крым. В этой среде представлены результаты разных, и даже альтернативных, подходов к оценке сейсмической опасности. Интегрированные в ГИС инструменты для анализа геоданных и интерактивных запросов дают возможность исследователю самостоятельно оценивать степень сейсмической опасности по различным критериям в интересующих регионах. Тем самым пользователь самостоятельно проводит системный анализ результатов, полученных различными методами распознавания образов, и формулирует окончательный результат с учетом тех или иных специфических требований. Функционал реализованной ГИС обладает широкими возможностями для анализа и интерпретации полученных результатов. В частности, результаты можно геометрически совмещать, что дает возможность комплексной оценки сейсмической опасности. Это позволяет проводить всестороннее системное изучение сейсмичных регионов и многофакторную оценку рисков.

Подобная система создана впервые. Она позволяет давать наиболее объективную оценку сейсмической опасности, поскольку объединяет разные подходы к такой оценке в единой, унифицированной среде. Другие существующие системы (напр., GSHAP, карты ОСР, ДСР, СМР и др.) не обладают подобным широким охватом существующих возможностей, а нацелены в основном на одностороннее изучение вопроса.

На сегодня система реализована в виде настольной версии. В дальнейшем планируется создание сетевой версии с централизованным хранилищем данных на серверах, что даст возможность многопользовательского доступа к системе. Веб-версия будет реализована с использованием технологии геопорталов, не требующих от пользователя никакого специализированного клиентского программного обеспечения. Планируется также реализация голосового интерфейса системы, а также внедрение элементов искусственного интеллекта для автоматического составления ответов на запросы пользователей.

#### **Список использованных источников**

Алексеевская М.А., А.М. Габриэлов, А.Д. Гвишиани, И.М. Гельфанд, Е.Я. Ранцман (1977), Морфоструктурное районирование горных стран по формализованным признакам, Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии (Вычислительная сейсмология. Вып. 10.), сс. 33–49.

Гвишиани А.Д., А.И. Горшков, Е.Я. Ранцман, А. Систернас, А.А. Соловьев (1988), Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности, М.: Наука, 176 с.

Гвишиани А.Д., С.М. Агаян, М.Н. Добровольский, Б.А. Дзобоев (2013а), Объективная классификация эпицентров и распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии, Геоинформатика, № 2, сс. 44–57.

Гвишиани А.Д., Б.А. Дзобоев, С.М. Агаян (2013б), О новом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе, Физика Земли, № 6, сс. 3–19, doi: 10.7868/S0002333713060045.

Гвишиани А.Д., Б.А. Дзобоев, С.М. Агаян (2016), Интеллектуальная система распознавания FCAZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа, Физика Земли, № 4, сс. 3–23, doi: 10.7868/S0002333716040013.

Гвишиани А.Д., С.М. Агаян, Б.А. Дзобоев, И.О. Белов (2017) Распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений с одним классом обучения, Доклады Академии наук, Том. 474, № 1. сс. 86–92. doi: 10.7868/S0869565217130175.

Гельфанд И.М., Ш.А. Губерман, В.И. Кейлис-Борок, Л. Кнопов, Ф.С. Пресс, Е.Я. Ранцман, И.М. Ротвайн, А.М. Садовский (1976), Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие регионы), Исследование сейсмичности и моделей Земли (Вычислительная сейсмология. Вып. 9.), сс. 3–91.

Горшков А.И. (2010), Распознавание мест сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском поясе, Вычислительная сейсмология, Вып. 40, М.: КРАСАНД, 472 с.

Дзобоев Б.А. (2014), Кластеризация в распознавании мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии и на Кавказе, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, М.: ИФЗ РАН, 132 с.

Соловьев А.А., А.Д. Гвишиани, А.И. Горшков, М.Н. Добровольский, О.В. Новикова (2014), Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов, Физика Земли, № 2, сс. 3–20. doi: 10.7868/S0002333714020112.

Соловьев Ал.А., А.И. Горшков, Ан.А. Соловьев (2016), Применение данных по литосферным магнитным аномалиям в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений, Физика Земли, № 6, сс. 21–27, doi: 10.7868/S0002333716050148.

Agayan S.M., Sh.R. Bogoutdinov, M.N. Dobrovolsky (2014), Discrete perfect sets and their application in cluster analysis, Cybernetics and Systems Analysis, Vol. 50, Is. 2, pp. 176–190, doi: 10.1007/s10559-014-9605-9.

Gvishiani A., M. Dobrovolsky, S. Agayan, B. Dzeboev (2013), Fuzzy-based clustering of epicenters and strong earthquake-prone areas, Environmental Engineering and Management Journal, Vol. 12, № 1, pp. 1–10.

<http://www.ncedc.org/anss/catalog-search.html> [дата обращения: 24.04.2019].

Ismail-Zadeh A., J.-L. Le Mouél, A. Soloviev, P. Tapponnier, I. Vorobieva (2007), Numerical modeling of crustal block-and-fault dynamics, earthquakes and slip rates in the Tibet-Himalayan region, Earth and Planetary Science Letters, Vol. 258, Is. 3–4, pp. 465–485. doi: 10.1016/j.epsl.2007.04.006.

Parvez I.A., A. Nekrasova, V. Kossobokov (2014), Estimation of seismic hazard and risks for the Himalayas and surrounding regions based on Unified Scaling Law for Earthquakes, Natural Hazards, Vol. 71, Is. 1, pp. 549–562, doi: 10.1007/s11069-013-0926-1.

## **5. Развитие новых методов интеллектуального анализа геомагнитных данных и системы наземных наблюдений магнитного поля Земли для изучения электромагнитных процессов в околоземном пространстве и их влияния на климат и технологическую инфраструктуру**

**Номер регистрации в ИС Минобрнауки: 0145-2018-0002**

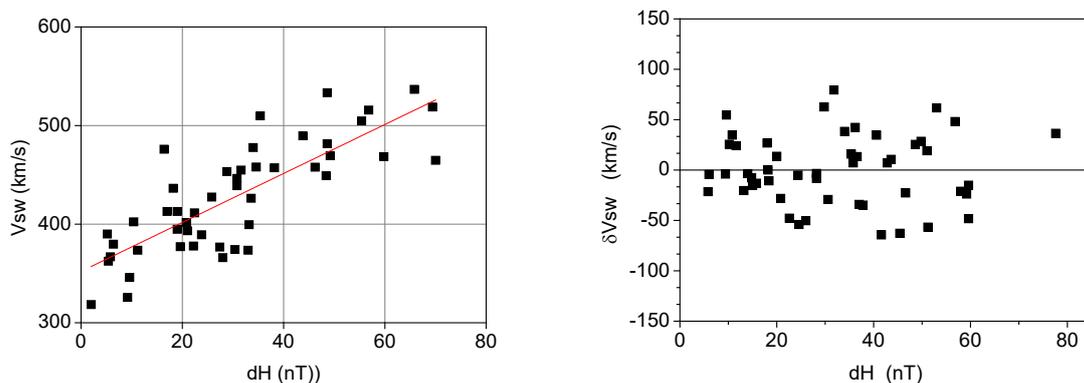
**Номер госрегистрации: АААА-А18-118021990126-4**

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

**Ответственный исполнитель: чл.-корр. РАН Соловьев А.А.**

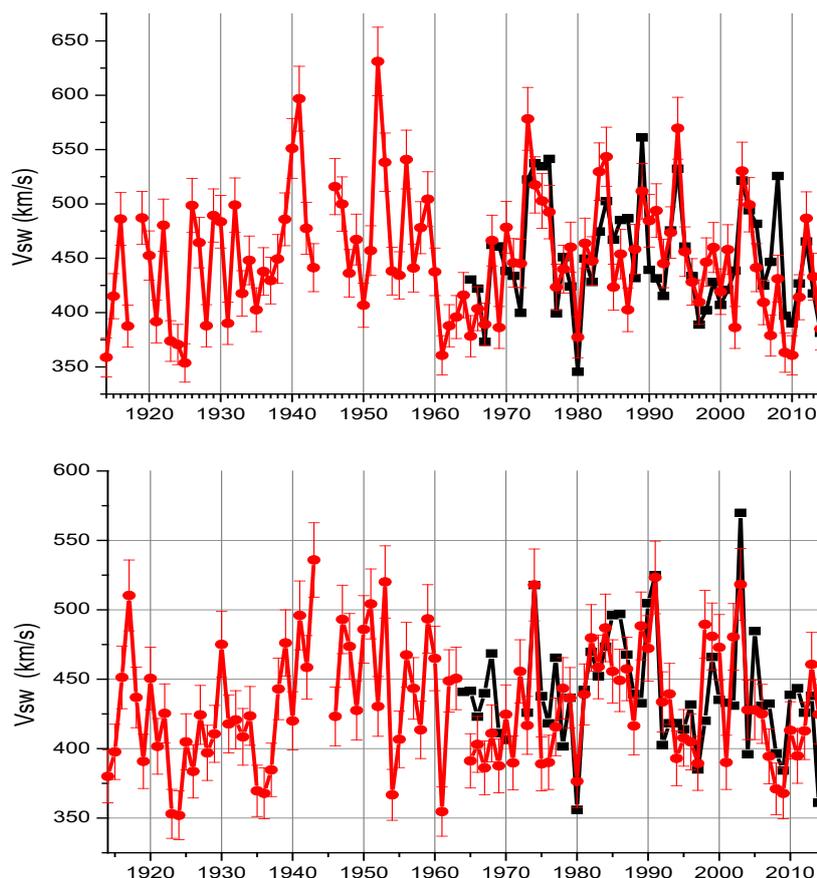
### **5.1.1. Исследование электромагнитных и климатических процессов высокоширотной области околоземного пространства**

Высокоскоростной поток (ВСП) солнечного ветра (СВ) является наиболее геоэффективным параметром для геомагнитной активности в высоких широтах. Увеличение среднегодовых скоростей СВ были зарегистрированы на нисходящей фазе всех солнечных циклов с 16 по 24 [*Lukianova et al.*, 2012; *Mursula et al.*, 2015]. Длинный ряд усредненных за каждый отдельный месяц среднечасовых вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $\Delta H$ , которые измерены в обсерватории Соданкюля в 1914-2014 гг. (солнечные циклы 15-24), используется как индикатор скорости СВ. Этот ряд является самым длинным рядом непрерывных высокоширотных геомагнитных измерений (свыше 100 лет). Сезонные вариации, определяемые соотношением между  $\Delta H$  и скоростью СВ, учтены путем подсчета отдельных регрессий между  $\Delta H$  и скоростью СВ для каждого месяца. На рисунке 5.1 показана корреляция между  $\Delta H$  и скоростью СВ для всех январей с 1964 по 2014, корреляция статистически значима (коэффициент корреляции равен 0,76, нулевая корреляционная вероятность  $p = 0,0002$  с использованием модели авторегрессии шума первого порядка (AR-1)). Случайное распределение и диапазон 100 нТл гарантирует, что метод аппроксимации наименьших квадратов корректен, и может быть надежно использован для восстановления среднемесячных показателей скорости СВ.

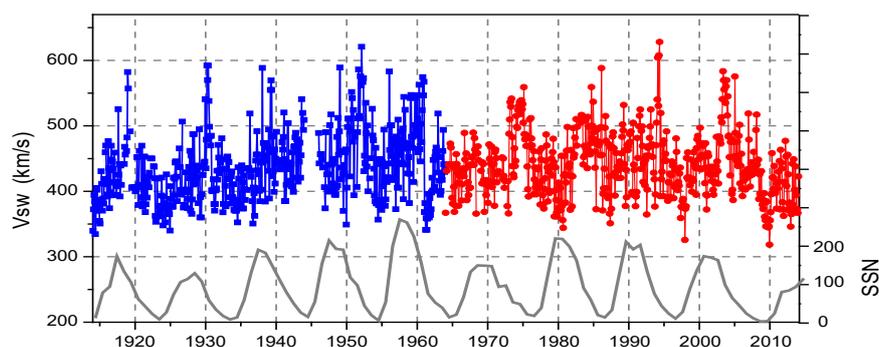


**Рисунок 5.1 — Корреляция между  $\Delta H$  и скоростью СВ ( $V_{sw}$ ) для всех январей с 1964 по 2014 гг.**

На рисунке 5.2 для двух отдельных месяцев (март и август) изображены значения скорости СВ, измеренные спутниками, начиная с 1964 г., и реконструированные значения, рассчитанные из  $\Delta H$  вместе с их  $\pm 1\sigma$  ошибками. На рисунке 5.3 показаны реконструированные и измеренные среднемесячные скорости СВ в 1914-2014 гг., в виде единого временного ряда и солнечные циклы (изменение числа солнечных пятен SSN).



**Рисунок 5.2 – Значения реконструированной скорости СВ, рассчитанные из  $\Delta H$  вместе с их  $\pm \sigma$  ошибками (красный) и измеренные спутниками скорости СВ (черный) для двух отдельных месяцев: март и август**



**Рисунок 5.3 – Реконструированные (синий) и измеренные (красный) среднемесячные скорости СВ в виде единого временного ряда и солнечные циклы по числу солнечных пятен (серый)**

Обнаружено, что месяц наибольшей активности ВСП СВ в каждом солнечном цикле приходится на завершающую фазу в следующих годах: 1919, 1930, 1941, 1952, 1959, 1973, 1982, 1994 и в 2003. Эти годы соответствуют годам, в которых ранее была зарегистрирована максимальная среднегодовая скорость СВ. Полученный результат означает, что наиболее долгоживущие корональные дыры, существующие на протяжении нескольких оборотов Солнца и приводящие к возникновению самых высоких среднегодовых скоростей СВ, также являются и источниками самых высоких среднемесячных скоростей СВ. Таким образом, доказано, что в каждом солнечном цикле в течение последних ста лет корональные дыры большой длительности (несколько периодов вращения Солнца) систематически являлись источниками экстремальных ВСП СВ, а короткоживущие дыры – источниками сравнительно медленного СВ.

На основе анализа рядов среднесуточных данных измерений метеорологического радара, расположенного на  $67^{\circ}$ с.ш. построена климатология и исследована межгодовая изменчивость температуры и нейтрального ветра на высотах  $\sim 80$ - $100$  км. Показано, что годовой ход температуры состоит из относительно теплой зимы (зимний максимум  $\sim 180$  К) и холодного лета (летний минимум  $\sim 120$  К). Температура более нестабильна зимой и среднесуточные значения могут внезапно упасть до 130 К в связи с внезапными стратосферными потеплениями, которые периодически возникают в зимней стратосфере Арктики. В зональном и в меридиональном ветре преобладают сезонные колебания. Средние зональные ветры летом направлены на запад на высотах 80-90 км (ниже мезопаузы) и на восток выше 90 км. В середине лета скорость ветра на верхней и нижней границе рассматриваемой области почти одинакова ( $\sim 30$  м/с). В зимний сезон (ноябрь-февраль) зональные ветры дуют на восток на всех высотах, и их скорость не превышает 10 м/с. Зональные ветры постепенно меняют направление с востока на запад в начале весны. Смена направления ветра с запада на восток происходит раньше на больших высотах, и в

результате в летний сезон (май-август) наблюдается вертикальный сдвиг ветра вблизи мезопаузы. На высотах ниже 90 км ветры продолжают дуть в западном направлении до сентября, а на верхних уровнях восточные ветры быстро возвращаются в исходное положение. В июле-августе самый сильный ветер, дующий на восток и запад (до 35 м/с) наблюдается на самом низком и самом высоком уровне, соответственно. Средние меридиональные ветры относительно слабы ( $>10$  м/с). Ветер, дующий в сторону экватора, доминирует в течение большей части года после начала летней смены направления. Летние ветры охватывают весь диапазон высот, а июльский максимум (до 15 м/с) локализован на высоте  $\sim 90$  км. Резкие изменения зимнего паттерна происходят под воздействием внезапного стратосферного потепления. В этом случае в середине зимы ветровой поток в сторону полюсов значительно усиливается (скорость достигает максимума на высоте  $\sim 80$  км) и распространяется по всему диапазону высоты.

### Развитие регрессионных трендов в одномерном случае

Дальнейшее развитие получили регрессионные тренды в одномерном случае. Для одномерного, в общем случае заданном на нерегулярной сетке ряда, было получено разбиение на чередующиеся противоположные тренды и участки нечетких экстремумов между ними. Иерархия мер близости и флэт-параметров построенной теории индуцируют иерархический взгляд на тренды и экстремумы исходного ряда. В работе используются два варианта близости  $\delta_i(\bar{t})$  узла  $\bar{t}$  к узлу  $t$  в  $T$ , зависящие от положительных  $r$  и  $p$ :

$$\delta_i(r, p)(\bar{t}) = \delta_i(\bar{t}) = \left( 1 - \frac{|\bar{t} - t|}{\max(t_N - t, t - t_1) + r} \right)^p \quad (\text{глобальная мера близости}) \quad \text{и}$$

$$\delta_i(r, p)(\bar{t}) = \delta_i(\bar{t}) = \begin{cases} \left( 1 - \frac{|\bar{t} - t|}{r} \right)^p, & |\bar{t} - t| \leq r \\ 0, & |\bar{t} - t| > r \end{cases} \quad (\text{локальная мера близости}).$$

Касательной  $R_{y,t}(\bar{t}) = a_i \bar{t} + b_i$  к функции  $y$  в точке  $t \in T$  считается линейная регрессия, построенная по взвешенному графику  $\Gamma_y(\delta_i)$ :  $\Gamma_y(\delta_i) = \{((\bar{t}, y_{\bar{t}}), \delta_i(\bar{t})), \bar{t} \in T\}$ .

Опуская стандартные вещи, связанные с линейными регрессиями, приведем формулы для  $a_i$  и  $b_i$ :

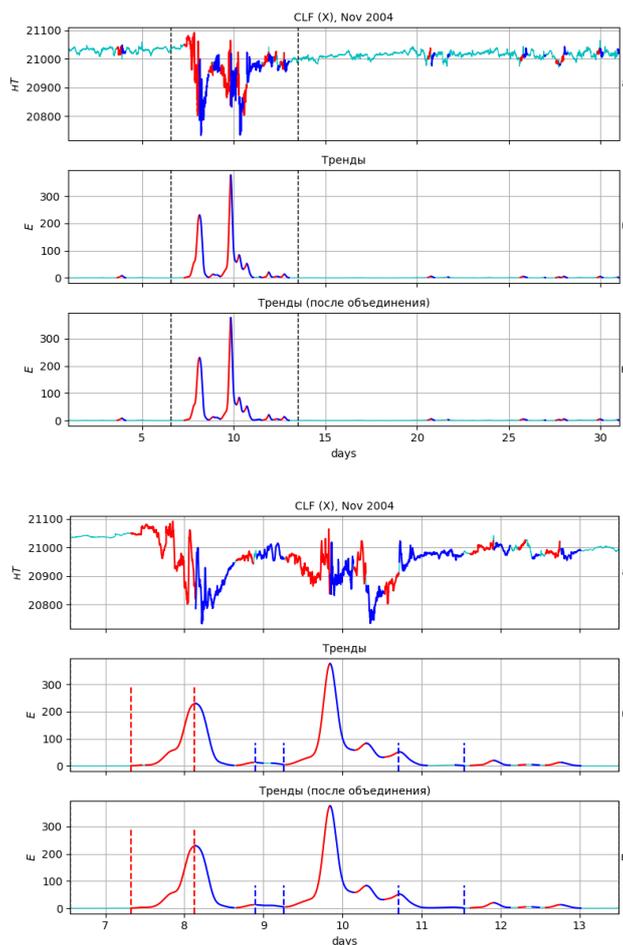
$$a_t = \frac{\begin{vmatrix} \sum \bar{t} \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} y(\bar{t}) & \sum \bar{t} \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} \\ \sum \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} y(\bar{t}) & \sum \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum \bar{t}^2 \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} & \sum \bar{t} \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} \\ \sum \bar{t} \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} & \sum \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} \end{vmatrix}}, \quad b_t = \frac{\begin{vmatrix} \sum \bar{t}^2 \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} & \sum \bar{t} \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} y(\bar{t}) \\ \sum \bar{t}^2 \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} & \sum \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} y(\bar{t}) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum \bar{t}^2 \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} & \sum \bar{t} \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} \\ \sum \bar{t} \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} & \sum \frac{\delta_t(\bar{t})}{(\bar{t}-t)^2} \end{vmatrix}}.$$

**Определение 1.** Угловой коэффициент  $a_t$  регрессионной касательной  $R_{y,t}$  называется регрессионной производной  $y$  в узле  $t$  и обозначается через  $(R'_y)(t)$ . Функция  $t \rightarrow a_t$  называется регрессионной производной для  $y$  и обозначается через  $R'_y \in F(T)$ . Функциональное соответствие  $y \rightarrow R'_y$  является линейным оператором на  $F(T)$ , называется регрессионным дифференцированием и обозначается через  $R'$ .

**Определение 2.** Значение  $a_t + b_t$  касательной  $R_{y,t}$  в узле  $t$  называется регрессионным значением  $y$  в узле  $t$  и обозначается через  $(R_y)(t)$ . Функция  $t \rightarrow a_t + b_t$  называется регрессионным сглаживанием  $y$  и обозначается через  $R_y \in F(T)$ . Функциональное соответствие  $y \rightarrow R_y$  является линейным оператором на  $F(T)$ , называется регрессионным сглаживанием и обозначается через  $R$ .

Под дифференцированием  $D$  понимается в общем случае суперпозиция операторов  $R'$  и  $R$ :  $D = D_{n,m} = R^n R' R^m$ . Получено строгое математическое определение трендов на  $f$  через ее производную  $f'$  с использованием меры превосходства тренда подъема над трендом спада в каждой точке и понятием флэт-функции (отсутствие тренда). Через них дано определение нечетких экстремумов функции  $f$ .

В качестве примера использовались данные с обсерватории CLF (Chambon la Foret) глобальной сети магнитных наблюдений ИНТЕРМАГНЕТ. Была проанализирована компонента  $X$  за ноябрь 2004 года. Этот период интересен тем, что с 8 по 11 произошла сложная магнитная буря, состоящая из двух частей. На рисунке 5.4 изображена исследуемая магнитная запись и функционал «энергия» (средний график). Также, на рисунке изображены исследуемые фрагменты записей, обозначенные вертикальными пунктирными линиями.



**Рисунок 5.4 – Морфология магнитной записи через тренды на выпрямлении (слева) и увеличенный фрагмент (справа)**

Сначала были выделены сильные тренды на функционале. Красным цветом обозначены положительные сильные тренды этого функционала, синим – отрицательные сильные тренды (средний график). На рисунке 5.4 также показаны тренды после объединения одноименных сильных трендов с флэт участками (нижний график). Красными вертикальными пунктирными линиями обозначены получившиеся таким образом положительные тренды, а синими – отрицательные. Как видно из рисунка, в период с 8 по 11 апреля были выделены два глобальных экстремума, что соответствует сложному характеру магнитной бури, произошедшей в этот период.

### **Цифровая фильтрация одноканальных геомагнитных наблюдений**

В настоящее время обсерваторские геомагнитные наблюдения (ГМН) подвергаются, в основном, первичной обработке для решений задач рутинных статистических вычислений или редактирования данных; одновременно, действующая научно-техническая практика выдвигает вполне очевидные требования к повышению качества ГМН, расширению математического арсенала средств вторичной цифровой обработки и построению глобальных

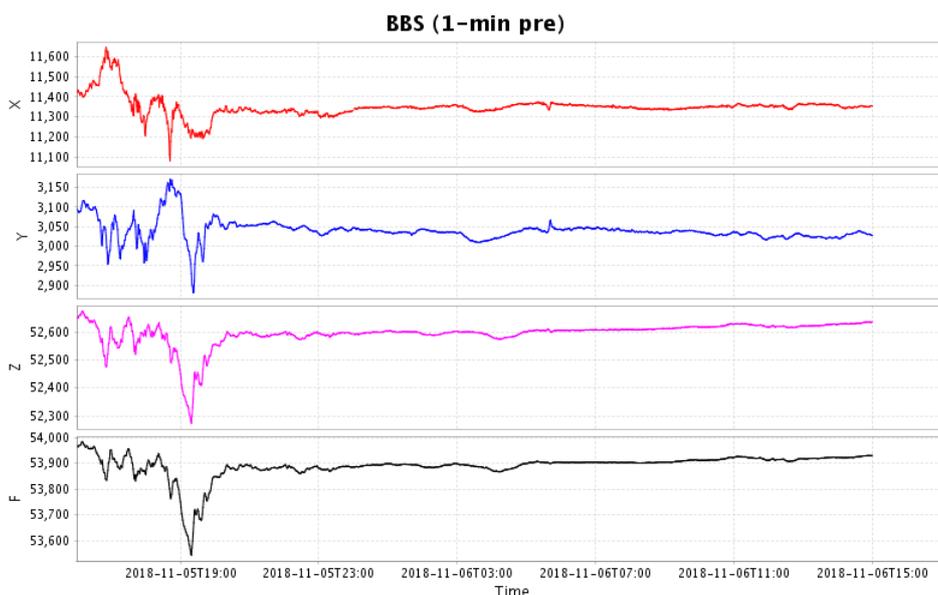
геомагнитных моделей. Создание новых методов цифровой обработки является актуальным направлением геофизики и геоинформатики [Mandea, Korte, 2011; Love, 2008; Gvishiani et al., 2014; Гвишиани, Лукьянова, 2015]. Существенные достижения в развитии указанного направления изложены в [Soloviev et al., 2012a, 2012b, 2009; Gvishiani et al., 2008]. Предлагаемые методы и алгоритмы локальных и сплайновых аппроксимаций для цифровой обработки в предметной области ГМН предназначаются для задач оценивания многопараметрических моделей, фильтрации и сглаживания сложных зависимостей и реализации обобщённого спектрального анализа. Данные методы и алгоритмы нацелены на задачи цифровой обработки ГМН, которые традиционными подходами решаются не в полной мере эффективно. Так, содержащиеся в распространённых программных пакетах стандартные цифровые фильтры плохо работают на ограниченных временных интервалах; спектральный анализ на основе дискретного преобразования Фурье реализуется для нестационарных ГМН с большими погрешностями и т.д. Математический аппарат, рассмотренный здесь в обзорном плане, базируется на результатах работы [Гетманов, 2011].

Разработанный метод цифровой фильтрации геомагнитных наблюдений основан на построении локальных аппроксимационных моделей в виде нелинейных функций с малым числом параметров, задании локальных функционалов и решении последовательности несвязанных задач условной минимизации локальных функционалов. Метод предназначен для задач фильтрации одноканальных наблюдений, в том числе с использованием связи трёхканальных наблюдений от векторных магнитометров и одноканальных наблюдений от скалярных магнитометров. Предложенные методы локальных и сплайновых аппроксимаций для цифровой обработки геомагнитных наблюдений адекватны рассматриваемой предметной области. Разработанные алгоритмы ориентированы на применение в задачах цифровой обработки геомагнитных наблюдений, которые не могут быть решены традиционными подходами. Реализация предложенных метода и алгоритмов перспективна для современных задач цифровой обработки геомагнитных наблюдений.

### **Магнитные обсерватории ГЦ РАН и анализ получаемых наблюдений**

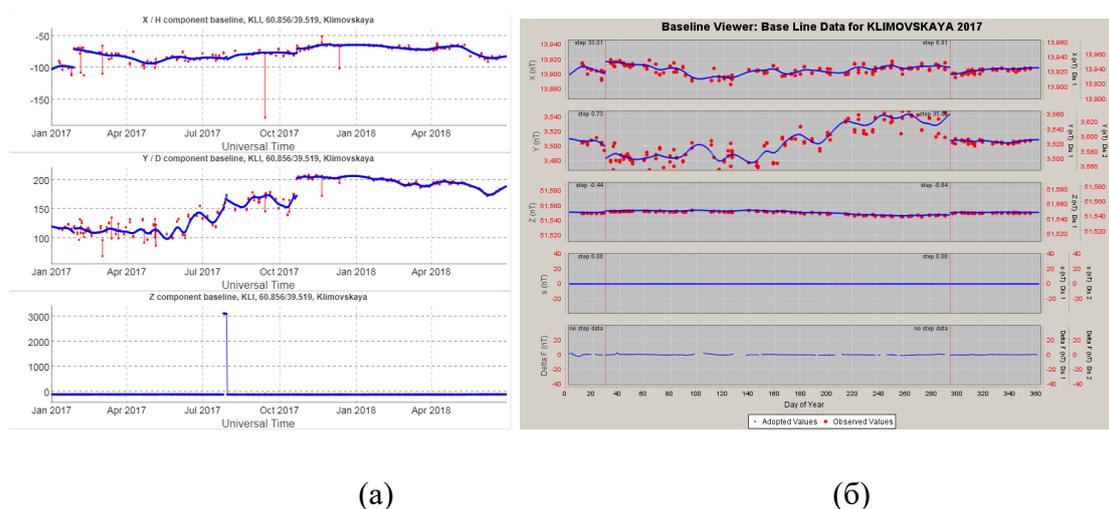
Была построена и введена в эксплуатацию новая геомагнитная обсерватория «Белое море» (IAGA-код WSE, Республика Карелия) на базе Беломорской биологической станции им. Н.А. Перцова (ББС) Биологического факультета МГУ им. Ломоносова. В течение года были организованы четыре экспедиции сотрудников ГЦ РАН на ББС. На этапе подготовительных работ была проведена детальная полевая магнитоградиентная съемка

местности и был выбран участок для строительства павильона из немагнитных материалов и размещения в нем нового магнитометра на специальном стеклянном постаменте. На обсерватории установлен векторный оверхаузеровский магнитометр POS-4 – инновационный прибор, разработанный Лабораторией квантовой магнитометрии Уральского федерального университета. Налажена передача, первичная обработка и хранение минутных и субминутных (15 с) данных обсерватории. Данные доступны для скачивания в виде цифровых массивов и графиков. Пример визуализации данных приведен на рисунке 5.5.



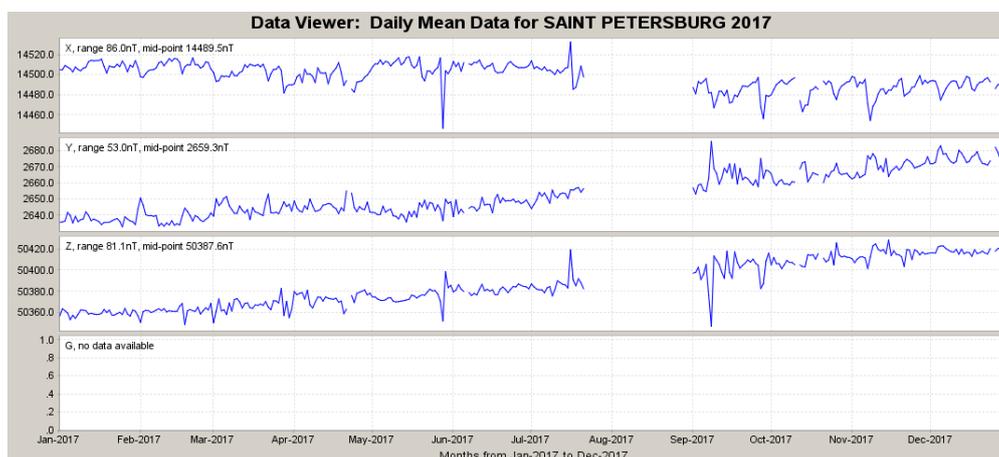
**Рисунок 5.5 – Пример визуализации 1-минутных данных обсерватории WSE: три ортогональные компоненты и модуль вектора магнитного поля (<http://geomag.gcras.ru>)**

База геомагнитных измерений была пополнена годовыми массивами данных, полученными на обсерваториях «Санкт-Петербург», «Климовская» и «Белое море». В процессе обработки данных обсерватории «Климовская» были разработаны программные инструменты, позволяющие в автоматическом режиме выделять и устранять выбросы на секундных данных. Кроме того, разработанная система отображения и сравнительного анализа данных [Соловьев, Кудин, 2018] развернута на сервере и используется для оперативного контроля данных, получаемых в режиме реального времени. Базисные значения, полученные после отбраковки неверных наблюдений и фильтрации выбросов в наблюдаемых значениях, по каждой из базисных компонент интерполировались алгоритмом GrS (гравитационное сглаживание) [Агаян и др., 2010; Гвишиани и др., 2011] для построения регулярной базисной кривой по каждой компоненте (рис. 5.6).



**Рисунок 5.6 — Необработанные базисные кривые для компонент X, Y и Z обсерватории «Климовская» за 2017 г. и первую половину 2018 г. (а) и базисные кривые для компонент X, Y, Z, F0 и Delta F обсерватории «Климовская» за 2017 г. в официальном приложении ИНТЕРМАГНЕТ (б)**

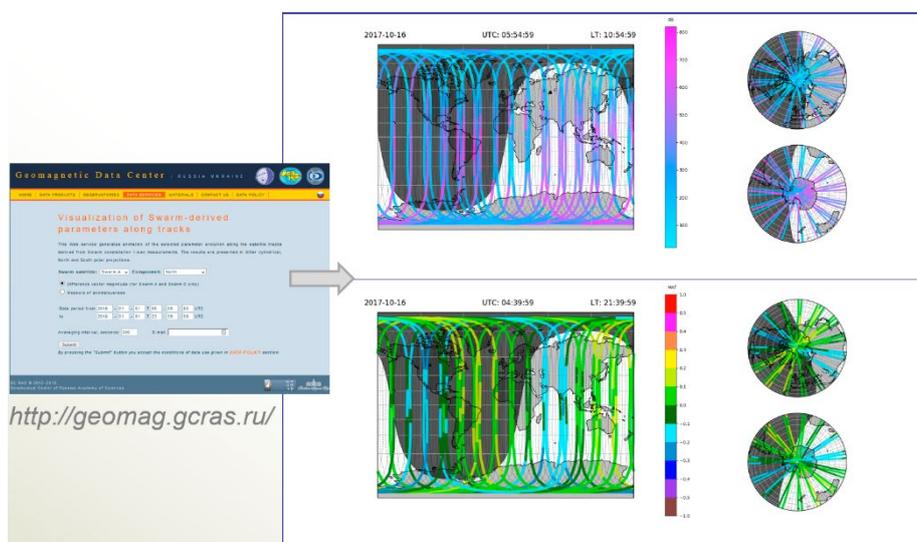
По итогам 2017 г. данные магнитного поля Земли, зарегистрированные на обсерватории «Санкт-Петербург» (IAGA-код SPG), были приведены в соответствие требованиям, предъявляемым к качеству окончательных данных международной сети наблюдений ИНТЕРМАГНЕТ (рис. 5.7). Зонированные данные были подвергнуты анализу техногенных выбросов с помощью алгоритма SPs [Soloviev et al., 2012a, 2012b]. На основе обработанных наборов данных был сформирован годовой отчет обсерватории в форматах, описанных в техническом руководстве ИНТЕРМАГНЕТ [St-Louis, 2012].



**Рисунок 5.7 – Окончательные минутные данные обсерватории «Санкт-Петербург» за 2017 г. в официальном приложении ИНТЕРМАГНЕТ (усреднение посуточно)**

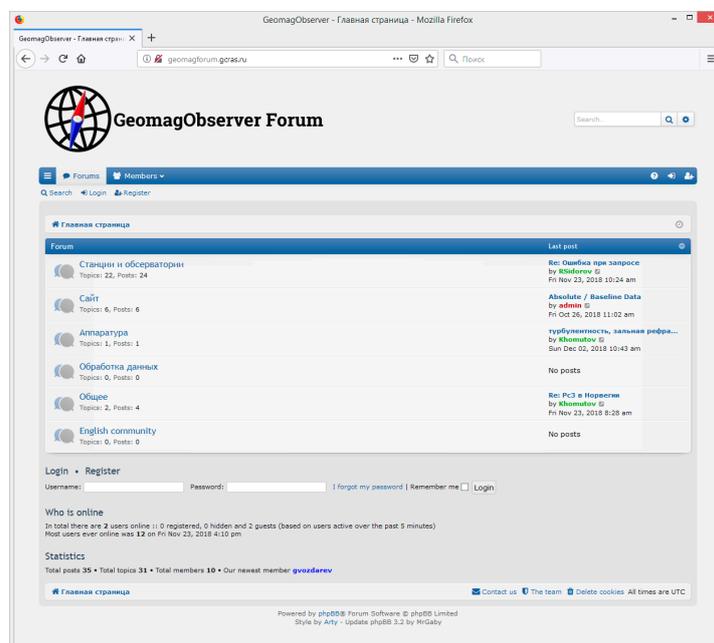
Был расширен функционал АПК «МАГНУС», обеспечивающего хранение, первичную обработку и анализ поступающих обсерваторских и спутниковых геомагнитных данных математическими алгоритмами, доступными онлайн. За отчетный период был разработан онлайн-сервис для анимированной визуализации электромагнитных параметров вдоль

траекторий спутников Swarm, рассчитанных по спутниковым 1-секундным измерениям (<http://geomag.gcras.ru/dataserv-swarmtracks.html>) (рис. 5.8).



**Рисунок 5.8 – Пример анимированной визуализации параметров (градиент поля и мера аномальности) по спутниковым данным вдоль их пролетов (<http://geomag.gcras.ru>)**

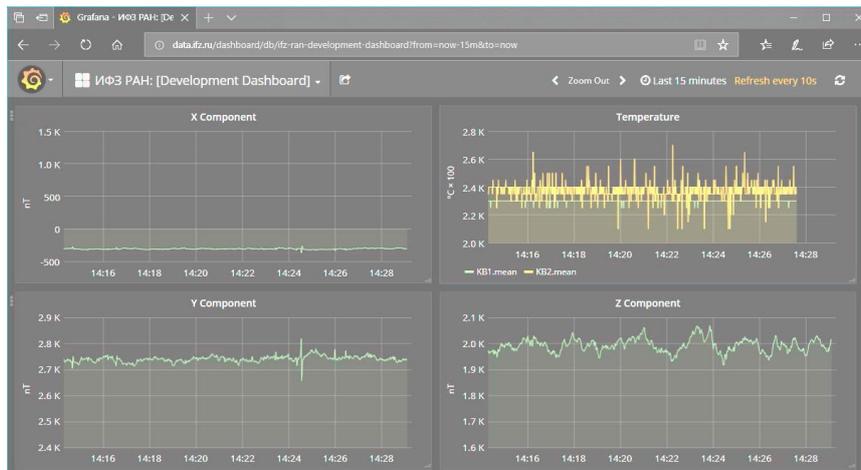
Впервые разработан и введен в эксплуатацию онлайн-форум GeomagObserver Forum (<http://geomagforum.gcras.ru/>), предназначенный для общения специалистов в обсерваторских магнитных наблюдениях и других заинтересованных исследователей. Форум поделен на тематические подразделы (рис. 5.9).



**Рисунок 5.9 – Заглавная страница форума GeomagObserver Forum (<http://geomagforum.gcras.ru/>)**

Дальнейшее развитие получила разработка импортозамещающего дата-логгера для регистрации геомагнитных данных на полномасштабных обсерваториях совместно с Институтом физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН. Регистратор построен на базе

одноплатного компьютера с ARM-процессором и отличается малым энергопотреблением (~ 3 Вт), небольшим размером и весом. Он позволяет осуществлять оперативную (в режиме реального времени) передачу данных с использованием протокола SEEDLink (рис. 5.10).



**Рисунок 5.10 – Визуализация данных вариометра FGE, передаваемых дата-логгером в центр сбора данных. На графике представлены текущие значения X-компоненты геомагнитного поля и значения температуры**

#### Список использованных источников

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

А. Д. Гвишиани, С. М. Агаян, Ш. Р. Богоутдинов, А. И. Каган, “Гравитационное сглаживание временных рядов” // Тр. ИММ УрО РАН, 17, № 2, 2011. С.62–70

Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю. Геоинформатика и наблюдения магнитного поля Земли: российский сегмент // Физика Земли. 2015. №2. С.3-20. doi:10.7868/S0002333715020040.

Гетманов В.Г. Цифровая обработка нестационарных колебательных сигналов на основе локальных и сплайновых моделей. М.: Изд-во НИЯУ МИФИ. 2011.298с.

Соловьев А.А., Кудин Д.В. «Веб-сервис Plot 2.0 для сравнительного анализа геомагнитных данных обсерваторий в рамках АПК «МАГНУС»». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615198 от 27 апреля 2018 г.

Gvishiani A.D., Agayan S.M., Bogoutdinov Sh. R. et al. Mathematical methods of geoinformatics. III. Fuzzy comparisons and recognition of anomalies in time series //Cybernetics and Systems Analysis. 2008. Т. 44. № 3. С. 309-323. DOI: 10.1007/s10559-008-9009-9.

Gvishiani A., Lukianova R., Soloviev A. et al. 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: 10.1107/s10712-014-9297-8.

Love J. J. Magnetic monitoring of Earth and space// Phys. Today.2008. 61(2). 31–37.

Lukianova, R., K. Mursula, and A. Kozlovsky (2012), Response of the polar magnetic field intensity to the exceptionally high solar wind streams in 2003, Geophys. Res. Lett., 39, L04101, doi:10.1029/2011GL050420

Mandea M., Korte M. Geomagnetic Observations and Models. Springer IAGA Special Sopron Book Series, Vol.5. 1-st Edition. 2011. XV. 343p.

Mursula, K., R. Lukianova, and L. Holappa (2015), Occurrence of high-speed solar wind streams over the Grand Modern Maximum, *Astrophys. J.*, 801(1), 30

Soloviev A.A. et al. Automated recognition of spikes in 1 HZ data recorded at the Easter Island magnetic observatory// Earth, Planets and Space. 2012a. T. 64. № 9. C. 743-752. DOI: 10.5047/eps.2012.03.004.

A.A. Soloviev, S.M. Agayan, A.D. Gvishiani, Sh.R. Bogoutdinov, A. Chulliat, Recognition of Disturbances with Specified Morphology in Time Series: Part 2. Spikes on 1-s Magnetograms, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2012b, Vol. 48, No. 5, pp. 395–409

A.Soloviev, S.Bogoutdinov, S.Agayan, A.Gvishiani, E.Kihn. Detection of hardware failures at INTERMAGNET stations: application of artificial intelligence techniques to geomagnetic records study (502-MON-P1700-0459). Abstract Book of the IAGA 11th Scientific Assembly (Sopron, 24-29 August, 2009). Hungary. 2009. P. 95

St-Louis, B., INTERMAGNET Technical Reference Manual, Version 4.6, 92 pp., 2012

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

**Номер регистрации в ИС Минобрнауки: 0145-2018-0003**

**Номер госрегистрации: АААА-А18-118021990131-8**

**Руководитель: д.т.н. В.Н. Татаринов**

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

**И.Ю. Колесников, н.с. А.И. Маневич**

Проект направлен на решение фундаментальной задачи геолого-геофизического изучения литосферы, а именно – на изучение геодинамических процессов и особенностей пространственно-временного изменения деформационного поля в зоне контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты. В 2018 году исследования были направлены на решение следующих задач:

1. Переинтерпретация результатов ГНСС-наблюдений за 2010-2016 гг. в зоне контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты, построение карт векторов скоростей СДЗК и скоростей деформации (дилатации) с учетом блокового строения;

2. Усовершенствование программы интерполяции и прогноза скоростей современных движений, определяемых по данным ГНСС наблюдений, на основе методов искусственного интеллекта.

### **6.1. Переинтерпретация результатов ГНСС-наблюдений за 2010-2016 гг. в зоне контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты, построение карт векторов скоростей СДЗК и скоростей деформации (дилатации) с учетом блокового строения**

Важнейшим источником получения данных о геодинамическом режиме и проверке различных геодинамических моделей поведения верхней части литосферы являются инструментальные методы. В последние 20 лет активно развиваются методы, основанные на использовании глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Они позволяют проследить закономерности в пространственно-временном изменении современных движений земной коры (СДЗК) и соотношения региональных и локальных составляющих тектонических движений на дистанциях от единиц до тысяч километров. В 2010-2016 гг. в районе контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты был создан геодинамический полигон для ГНСС наблюдений за современными движениями

земной коры и получены уникальные данные о направленности движений в этом районе. Ниже приведены результаты повторной обработки данных инструментальных наблюдений с учетом новой методики, позволяющей учесть масштабный фактор и повысить надежность определения скоростей деформаций.

Основой для кинематической обработки GPS наблюдений явились векторы базовых линий и их корреляционные матрицы, полученные в результате статической обработки и диагностического уравнивания циклов измерений 2011-2014 гг. с использованием программного обеспечения *MAGNET Office Tools*.

Уравнивание выполнялось по методу наименьших квадратов, расширенному на неравноточные и зависимые измерения. Уравнивание сети, образованной повторными измерениями, выполнялось как нуль-свободное, когда ни одно из значений смещений ее пунктов не принималось за исходное (опорное). Таким образом, были получены векторы взаимных смещений пунктов по отношению к начальной эпохе измерений и их среднему значению, что говорит об отсутствии в полученных смещениях глобального и регионального трендов движений. По результатам определения векторов смещений ( $D_e, D_n, D_u$ ) вычислялись их годовые скорости ( $V_e, V_n, V_u$ ).

Перевычисление результатов наблюдений за 2012-2016 гг. заключалось в учете масштабного эффекта из-за не равновеликости геометрических фигур триангуляции Делоне и в вычислении скоростей движений и деформаций земной поверхности. Горизонтальные деформации дилатации в треугольниках триангуляции Делоне ввиду их неравных площадей масштабировались путем их приведения к единой средней площади треугольника.

Рассматривая формулы вычисления деформаций  $\gamma_1, \gamma_2, \Delta$  и  $\omega$ , можно видеть, что их знаменатель равен или пропорционален площади  $P_i$  соответствующего треугольника.

$$\gamma_1 = \frac{x_2(\Delta y_3 - \Delta y_1) + y_2(\Delta x_3 - \Delta x_1) - x_3(\Delta y_2 - \Delta y_1) - y_3(\Delta x_2 - \Delta x_1)}{x_2 y_3 - x_3 y_2};$$

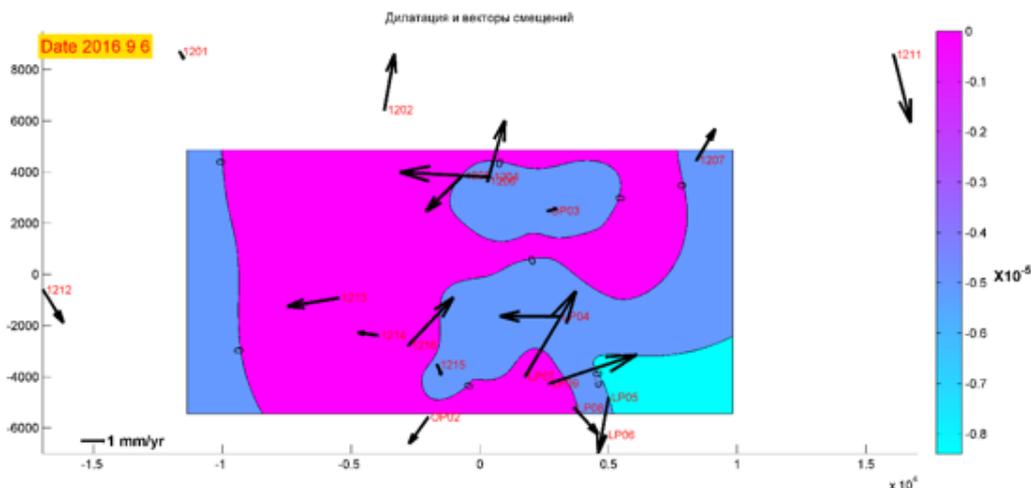
$$\gamma_2 = \frac{x_2(\Delta x_3 - \Delta x_1) + y_2(\Delta y_3 - \Delta y_1) - x_3(\Delta x_2 - \Delta x_1) - y_3(\Delta y_2 - \Delta y_1)}{x_2 y_3 - x_3 y_2};$$

$$\Delta = \frac{x_2(\Delta y_3 - \Delta y_1) - y_2(\Delta x_3 - \Delta x_1) - x_3(\Delta y_2 - \Delta y_1) + y_3(\Delta x_2 - \Delta x_1)}{x_2 y_3 - x_3 y_2};$$

$$\omega = \frac{-x_2(\Delta x_3 - \Delta x_1) - y_2(\Delta y_3 - \Delta y_1) + x_3(\Delta x_2 - \Delta x_1) + y_3(\Delta y_2 - \Delta y_1)}{2(x_2 y_3 - x_3 y_2)}.$$

Тогда масштабный коэффициент приведения к единой средней площади треугольника контрольной сети получаем как  $m = P_i/P_{cp}$ . Перемножая полученные значения деформаций на масштабный коэффициент, получаем масштабированные деформации, обеспечивая таким образом их взаимное сопоставление с учетом масштабного эффекта.

В итоге получены поля скоростей дилатации и смещений пунктов контрольной сети за период 2012-2016 гг. Результаты определения плановых векторов скоростей смещений и деформаций дилатации показаны на рисунке 6.1.



**Рисунок 6.1 – Результаты переинтерпретации данных ГНСС наблюдений с учетом масштабного эффекта и изолинии деформации дилатации, построенные для конечных элементов**

Полученные результаты показывают, что в пределах контрольной сети есть области с повышенными значениями растяжений-сжатий, достигающими  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  в южной части геодинамического полигона. Эти области охватывают участок Енисейский, поэтому результаты наблюдений на геодинамическом полигоне должны привлечь внимание при обосновании геозкологической безопасности захоронения РАО в данном районе. Необходимо также разработать методические подходы к учету масштабных пространственно-временных эффектов при геолого-геофизической интерпретации данных наблюдений на геодинамическом полигоне.

Очевидно, что для полного представления об уровнях опасности, необходим прогноз тектонической активности и эволюции структурных форм геологической среды. Возможным решением этой задачи является использование опыта традиционных геотектонических и структурно-морфологических исследований в совокупности с современными алгоритмами анализа геолого-геофизических данных, позволяющими минимизировать влияние субъективного фактора при интерпретации массива исходных данных, осложненных «шумами» различного происхождения.

## **6.2. Усовершенствование программы интерполяции и прогноза скоростей современных движений, определяемых по данным ГНСС наблюдений, на основе методов искусственного интеллекта**

При конструировании моделей алгоритмов интерполяции и прогноза скоростей

СДЗК на основе методов машинного обучения возникает *проблема отбора признаков*, т.к. на этапах формирования данных не ясно какие именно геологические признаки могут быть бесполезны. Был разработан способ для выявления комбинаций и отдельных информативных признаков на основе анализа обобщенной функции состояния геологической среды, которая рассчитывается в аддитивной форме [Бондарик и Ярг, 2014; Ческидов, 2012]:

$$\Phi_j = \sum_{j=1}^n f(\bar{x}_j) \quad (2.1)$$

где  $f(\bar{x}_j)$  – нормированный геологический признак.

Порядок расчета функции  $\Phi_j$  следующий:

1. Стадия сбора информации. Формируется массив числовых рядов значений геологических признаков  $f_1(x_{11}, \dots, x_{j1}), \dots, f_g(x_{1g}, \dots, x_{jg})$ . Для этого используются методы получения численной геологической информации – изыскания и моделирование;
2. Нормирование значений геологических признаков  $F(f_i(x_i)) \rightarrow \bar{F}(f_i(\bar{x}_i))$ ;

*Нормирование* – это процедура обработки данных для представления их в едином метрическом пространстве. Использование натуральных значений данных может быть осложнено с точки зрения вычислений, потому что абсолютные оценки количественных и качественных характеристик исследуемого района существенно различаются. К примеру, физико-механические свойства горных пород могут существенно различаться как в абсолютных измерениях, так и в шкалах измерений (например, градусы, м<sup>2</sup>, МПа и т.д.). Поэтому целесообразно преобразовывать натуральные значения в безразмерные значения параметров, которые будут определяться единой шкалой значений.

Преобразование значений геологических факторов определяется соотношением [Щитиков и др. 2003]:

$$\bar{x}_j = \frac{x_j - x_{j0}}{\lambda_j}, \quad (2.2)$$

где  $\bar{x}_j$  – преобразованное (нормированное) значение;  $x_j$  – натуральное значение геологического фактора;  $x_{j0}$  – центр варьирования для числового ряда  $n$ -го геологического фактора;  $\lambda_j$  – интервал варьирования для числового ряда  $n$ -го геологического фактора;  $j$  – количество значений в числовом ряду геологического фактора  $n$ .

Существует проблема выбора наиболее оптимальных оценочных параметров  $x_{j0}, \lambda_j$ . Расчеты нормирования геологических признаков были выполнены на основе

разработанного оригинального алгоритма нормирования.

3. Непосредственно расчет обобщающей функции  $\Phi(F)$ :

$$\Phi(F_n)_j = \sqrt{(\bar{x}_{j1})^2 + \dots + (\bar{x}_{jg})^2} \quad (2.3)$$

где  $\hat{x}_{jg}$  – преобразованное натуральное значение  $x_j$  геологического признака  $f_g$ ;

$F$  – набор геологических признаков;

$j$  – порядковый номер значения в выборке;

$g$  – порядковый номер геологического признака;

$n$  – порядковый номер комбинации признакового пространства.

Полученные числовые ряды  $\Phi(F_n)$  являются исходными для распознавания информативных признаков. Структура распознавания удобно представляется на основе деревьев принятых решений с использованием алгоритма поиска в глубину [Hastie et al., 2001].

Задача алгоритма – анализировать ветви на уровне  $k$  и выбирать наиболее перспективную ветвь для наращивания комбинаций признаков. Далее алгоритм спускается на следующий уровень и анализирует комбинации в пределах той ветви, по которой спустился. Мерой информативности в алгоритме является частота встречаемости дискретных значений обобщающей функции  $\Phi_{kn}(F)$  на заданном интервале  $q$ .

Для объемного тестирования метода была рассмотрена искусственная модель геодинамического полигона с большим набором признаков равномерно и неравномерно распределенных в пространстве, сильно- и слабо коррелируемых между собой. Пример такой модели приведен на рисунках 6.2 и 6.3. Набор параметров модели следующий:

- Координаты  $X, Y, Z$  (м). Полигон размещается в координатах (1000, 1000; 31000, 31000), рельеф варьируется в интервале 100 – 460 м;
- Горизонтальные и вертикальные скорости современных движений земной коры  $V_e, V_n, V_u$  (мм/год);
- Разломы и линеаменты полигона;
- Мощность осадочного чехла, м;
- Скорость распространения упругих волн, км/с;
- Степень выветривания горных пород;
- Осредненный модуль упругости кристаллического фундамента, МПа.

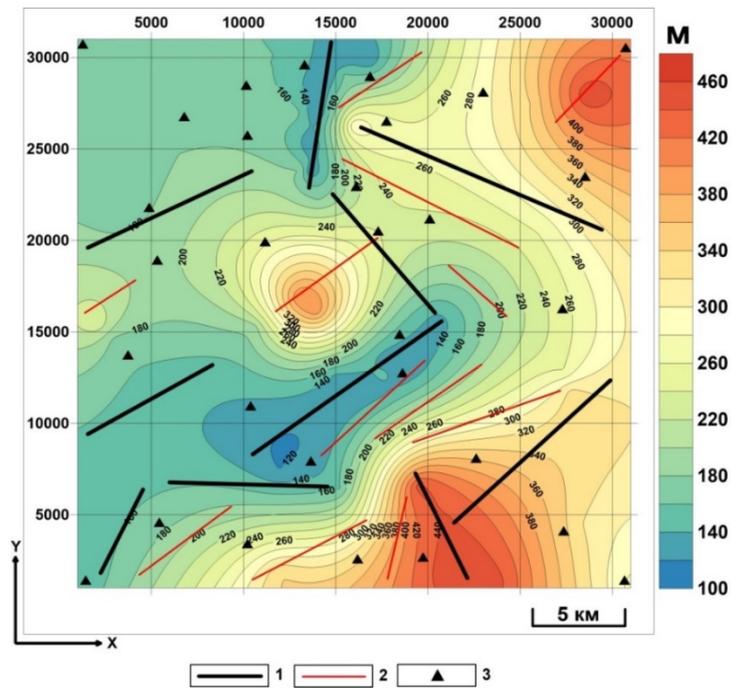


Рисунок 6.2 – Рельеф (м) и основные структурные элементы синтетической модели: 1 – разломы; 2 – линеаменты; 3 – пункты ГНСС наблюдений

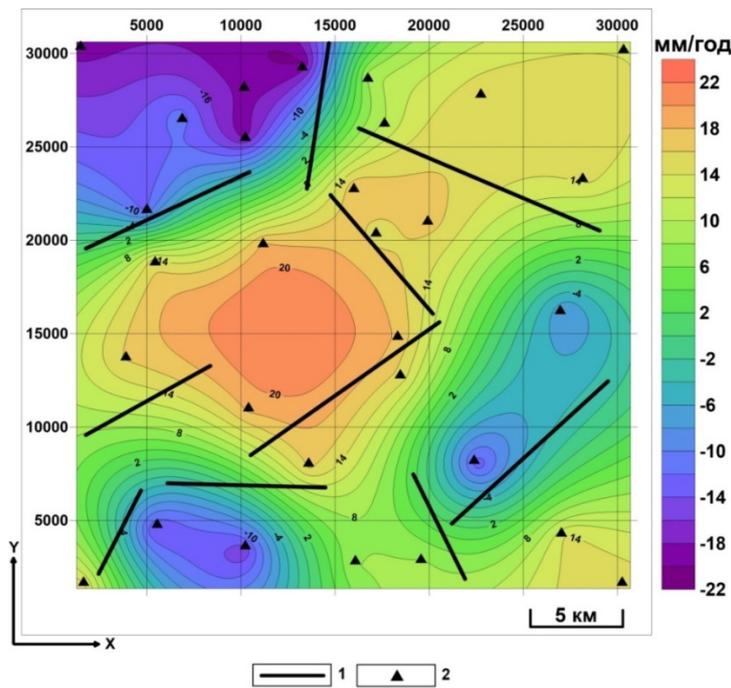


Рисунок 6.3 – Горизонтальные скорости СДЗК  $V_p$  (мм/год) синтетической модели: 1 – разломы; 2 - пункты ГНСС наблюдений

Ниже приводятся результаты расчетов для одного из наборов геологических признаков: рельеф  $Z$ , скорость распространения упругих волн  $V_p$ , плотность разломов  $\rho_p$ , плотность линеаментов  $\rho_l$ , мощность осадочного чехла  $M_{IV}$ , коэффициент выветривания горных пород  $K_b$ , расстояние до ближайшего разлома  $L$ , осредненный модуль упругости кристаллического фундамента  $E$ , градиент рельефа  $Grad(Z)$ . Исходные данные приведены в таблице 6.1. Количество интервалов было принято равным пяти.

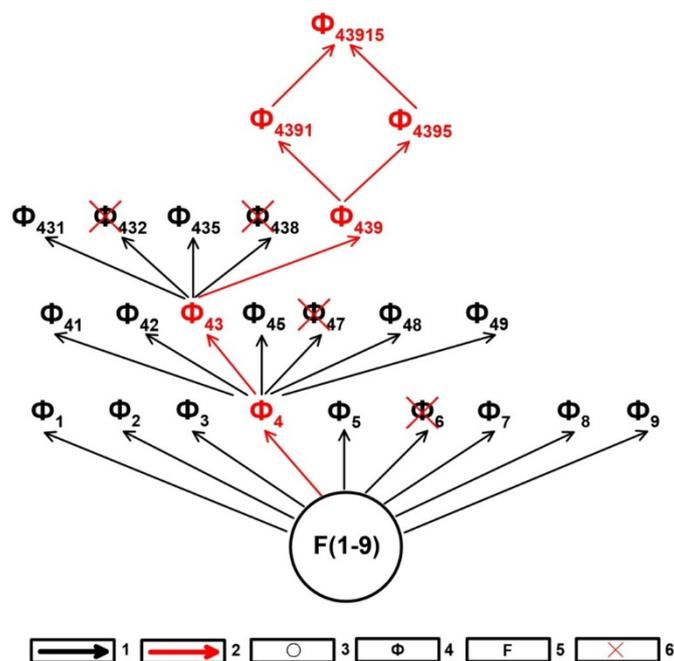
Таблица 6.1

Результаты расчета количества  $M_{1n}$  значений, попадающих в каждый интервал  $q$ ,  
на уровне  $k=1$

№ признака, n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\min(\Phi_{1n})$	0,30	0,75	0,00	0,00	0,06	0,77	0,05	0,57	0,05
$\max(\Phi_{1n})$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\max(\Phi_{1n}) - \min(\Phi_{1n})$	0,70	0,25	1,00	1,00	0,94	0,23	0,95	0,43	0,95
$q$ , при $l=5$	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
$M_{1n} \min(\Phi_{1n}) < \Phi_{1n} \leq d_1$	0	0	0	0	1	0	12	0	9
$M_{1n} d_1 < \Phi_{1n} \leq d_2$	9	0	12	6	11	0	9	0	10
$M_{1n} d_2 < \Phi_{1n} \leq d_3$	12	0	0	8	9	0	6	5	6
$M_{1n} d_3 < \Phi_{1n} \leq d_4$	4	12	6	8	5	2	0	18	4
$M_{1n} d_4 < \Phi_{1n} \leq d_5$	5	18	1	1	4	28	3	7	1
$\text{Min}(M_{1n})$	0	0	0	0	1	0	0	0	1
$\text{Max}(M_{1n})$	12	18	12	8	11	28	12	18	10

Наименьшее значение из всех максимальных количеств значений приходится на признак №4, соответственно, эта ветвь наращивается. Наибольшее значение – признак №6, соответственно, он удаляется из выборки вообще. Новая ветвь формируется из суммы оставшихся признаков: 4+1; 4+2; 4+3; 4+5; 4+7; 4+8; 4+9. Далее все расчеты повторяются до тех пор, пока не остается несколько оптимальных комбинаций признаков (рис. 6.4). Итоговые комбинации признаков следующие:

- 1+3+4+9 – рельеф, плотность разломов, плотность линеаментов, градиент рельефа;
- 3+4+5+9 – плотность разломов, плотность линеаментов, мощность осадочного чехла, градиент рельефа;
- 1+3+4+5+9 – рельеф, плотность разломов, плотность линеаментов, мощность осадочного чехла, градиент рельефа.



**Рисунок 6.4 – Представление комбинаций признаков в виде древовидной конструкции в результате расчетов. 1 – ветви дерева комбинаций признаков; 2 – трек наращивания ветвей, при запуске решения алгоритма; 3 – массив геологических признаков; 4 – обозначение обобщающей функции  $\Phi$ ; 5 – набор признаков  $F$ ; 6 – удаляемый геологический признак**

Описанная выше процедура использует простые частотные оценки для оценки равномерности распределения значений обобщающей функции  $\Phi_{kn}(F)$ . Пороговое значение можно адаптировать и корректировать под более корректные задачи отбора геологических признаков.

### Литература

Бондарик Г.К., Ярг Л.А. Инженерно-геологические изыскания: учебник, 3-е изд. М.: КДУ. 2014. 418 с.

Шитиков В. К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Г. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН. 2003. 464 с.

Ческидов В.В. Разработка метода построения сетей инженерно-геологических исследований техногенных массивов: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. тех. наук. – М. - Московский государственный горный университет (МГГУ). 2012. 168 с.

Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. Springer, 2001.

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

**Номер регистрации в ИС Минобрнауки: 0145-2018-0005**

**Номер госрегистрации: АААА-А18-118021990127-1**

**Руководитель: чл.-корр. РАН А.А. Соловьёв**

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

### **7.1. Цели и задачи исследования**

В 2018 г. основные усилия были направлены на создание основы базы геопространственных данных (БГД) проекта. БГД ГИС содержит тематические слои данных по ряду дисциплин в области наук о Земле. Доступ к данным организован средствами картографических сервисов, опубликованных на ГИС-сервере ГЦ РАН. Среди них – сервис «Геофизика», предоставляющий доступ к данным по физике твердой Земли и др. тематическим направлениям. Другим важным направлением была разработка ГИС-инструментов представления и анализа пространственных данных. Доступ к данным организован средствами специализированного геопортала, а также через стандартные сетевые протоколы OGC. Работы выполнялись в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № I.19 «Фундаментальные проблемы геолого-геофизического изучения литосферных процессов».

### **7.2. Формирование базы геопространственных данных проекта**

В 2018 г. решались задачи по включению данных современных моделей литосферного поля Земли высокого разрешения в БГД ГИС.

#### ***Остаточное мантийное гравитационное поле и остаточная топография***

Плотностные неоднородности мантии, связанные с аномалиями поля температур и химического состава, являются одной из главных движущих сил как вертикальных, так и горизонтальных движений литосферных блоков. Гравитационное поле содержит информацию об этих неоднородностях. Наблюдаемое гравитационное поле отображает также влияние практически всех неоднородностей Земли. Для выделения мантийной составляющей необходимо максимально очистить наблюдаемое гравитационное поле от посторонних влияний, в первую очередь определить и устранить эффект коры, который с одной стороны является наиболее значительным, а с другой, – может быть достаточно

надежно определен независимо от гравитационного поля по априорным (в основном сейсмическим) данным. Остаточные аномалии силы тяжести, которые с точностью до надежности исходной модели коры можно назвать мантийными аномалиями, лучше всего подходят для геодинамических построений и определения характера и интенсивности процессов, приводящих к эволюции литосферы и Земли в целом.

Попытки расчета мантийных гравитационных аномалий производились уже на первых профилях глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), однако построение полноценных трехмерных моделей оказалось возможным только после накопления достаточного количества исходных данных о строении коры. Важно отметить, что непосредственное сравнение результатов региональных исследований невозможно, так как обычно в них используются разные технологии, например, различные референц-модели, законы связи плотности и скорости и т.д. Поэтому построение новой глобальной карты мантийных аномалий силы тяжести, основанной на новейших данных о строении коры, и по единой методике является актуальной задачей.

В рамках работ расчеты выполнены на основании методики, разработанной в диссертации [Кабан, 2003] и опубликованной в статьях [Kaban, 2001; Kaban et al., 2003; Kaban et al., 2016]. По сравнению с более ранними результатами, полученными в указанных работах, данные расчеты принципиально улучшены за счет использования существенно новых данных о гравитационном поле и строении коры.

Основные положения используемой в данной работе методики можно сформулировать следующим образом. На первом этапе определяется исходная плотностная модель коры и верхней мантии, параметры которой задаются по имеющимся априорным данным. В настоящем исследовании эта модель состоит из двух слоев: осадочного чехла и консолидированной части коры, параметры которых существенно различны. Более дробное деление невозможно для столь обширной территории, поскольку только поверхности фундамента и Мохоровичича (Мохо), являясь опорными границами, устойчиво выделяются практически всеми сейсмическими методами.

Осадочный слой обычно неоднороден как по глубине, так и по простиранию. Более того, вариации плотности внутри осадочного чехла часто создают гораздо более существенный гравитационный эффект, чем вариации глубины до фундамента. Это особенно ясно проявляется в тех случаях, когда мощность осадочного чехла превышает 7–8 км. Так плотность осадочных пород около его подошвы близка к плотности вмещающих кристаллических пород. Основные осадочные бассейны детально изучены с использованием различных методов разведочной геофизики и для них имеются опорные данные бурения. Таким образом, имеется принципиальная возможность построить

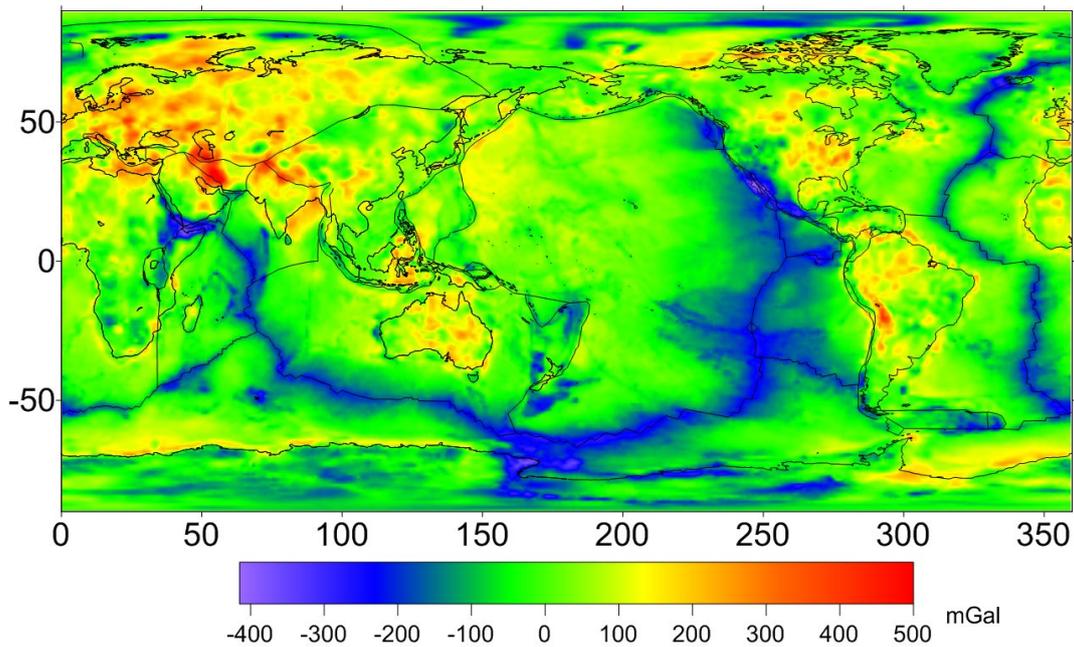
генерализованную плотностную модель осадочного чехла, не используя на этом этапе интерпретацию гравитационного поля. Влияние плотностных неоднородностей консолидированной коры, включая границу Мохо также определяется на основе имеющихся сейсмических данных. Вариации плотности в консолидированной коре определяются с помощью эмпирических кривых, связывающих изменения скорости сейсмических волн с изменениями плотности [Christensen and Mooney, 1998].

Гравитационное поле исходной модели коры вычисляется относительно горизонтально однородной базовой модели. Если нижняя граница модели также горизонтальна, то результирующее поле с точностью до постоянной составляющей не будет зависеть от выбора базовой модели. Для того, чтобы исключить из рассмотрения также и нижнюю границу, до которой производятся расчеты, мы накладываем на базовую модель единственное условие: плотность мантии в ней должна равняться средней плотности мантии, которая принимается в начальных построениях. В данном случае используется двухслойная референц-модель, в которой верхняя часть коры имеет плотность  $2,7 \text{ г/см}^3$ , а нижней –  $2,9 \text{ г/см}^3$ , плотность мантии –  $3,35 \text{ г/см}^3$ . Глубина до нижней границы составляет  $34,3 \text{ км}$ , что соответствует средней глубине до границы Мохо в пределах исследуемой области. Глубина до границы раздела плотности  $2,7/2,9 \text{ г/см}^3$  составляет  $14 \text{ км}$ , при этом средняя плотность коры равна  $2,82 \text{ г/см}^3$ , что согласуется с мировыми данными [Kaban et al., 2003].

Данные о границе Мохоровичича (Мохо), использованные для расчета её гравитационного эффекта были переданы в Геофизический Центр на предыдущем этапе. В дополнение к ним использовались данные о мощности осадочного чехла. Эти данные основаны карте, изданной Еххон [1985] и дополненные детальными данными для Северной Америки [Mooney and Kaban, 2010] и Евразии [Kaban et al., 2016]. Таким же образом был рассчитан и полный эффект коры. После устранения этого эффекта из наблюдаемых аномалий в свободном воздухе были получены остаточные мантийные аномалии силы тяжести (рис. 7.1)

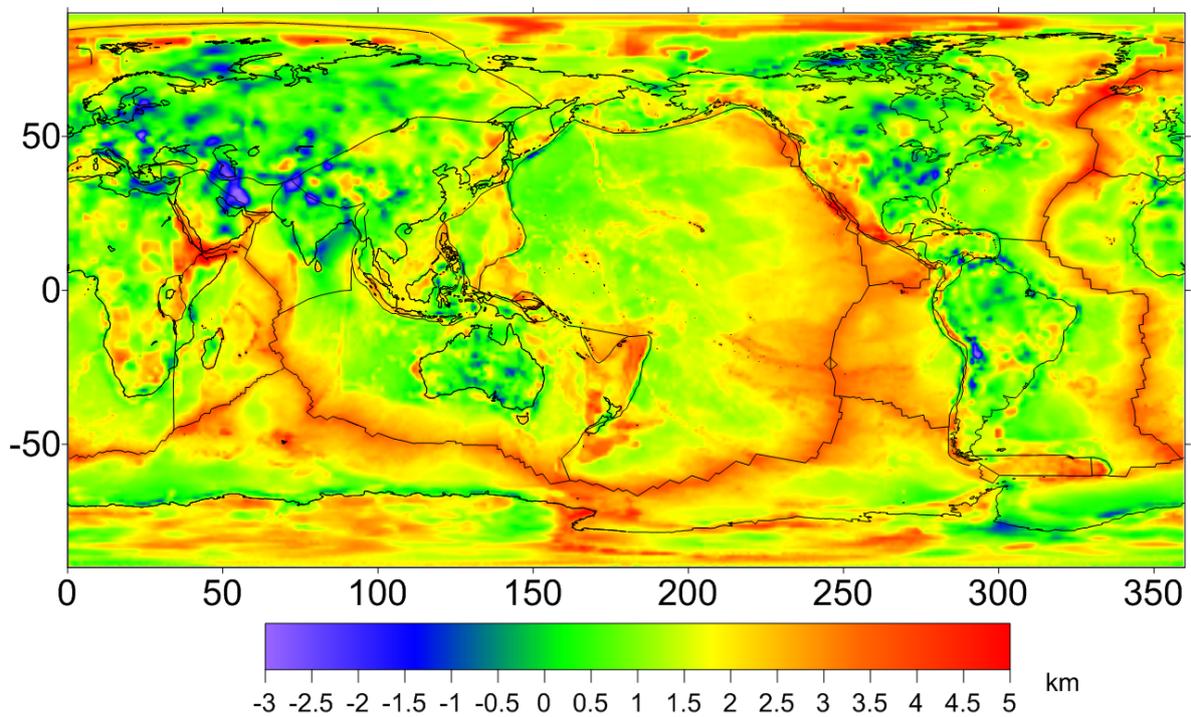
Были оценены [Kaban, 2003; Mooney and Kaban, 2010] возможные погрешности мантийных аномалий, которые в-основном связаны с погрешностями модели земной коры. Было показано, что для достаточно крупных структур (приблизительно для длин волн более  $>500 \text{ км}$ ) в «нормальных» океанических районах эта ошибка невелика и не превышает  $10 \text{ мГал}$ . В тех океанических районах, где мощность коры увеличена, эта ошибка уже может достигать  $25\text{--}40 \text{ мГал}$ . На континентах погрешность определения мантийной аномалии может быть существенно больше и варьируется от  $30 \text{ мГал}$  в хорошо изученных районах до примерно  $50\text{--}60 \text{ мГал}$  в тех районах, где имеются только разрозненные данные. Таким

образом рассчитанные вариации мантийных аномалий (-400 – +500 мГал) существенно превосходят возможные ошибки расчета.



**Рисунок 7.1 – Остаточные мантийные аномалии силы тяжести**

Кроме мантийных аномалий, по данным о строении была рассчитана остаточная топография ( $\rho$ ), которая представляет ту часть рельефа, которая не скомпенсирована в классическом смысле неоднородностями коры вплоть до границы Мохо (рис. 7.2).



**Рисунок 7.2 – Остаточная топография (для плотности 2,67 г/м<sup>3</sup>), отображающая влияние плотностных неоднородностей мантии, динамическое воздействие мантийной конвекции и нарушений изостатического равновесия литосферы**

Остаточная топография рассчитывается в соответствии со следующим выражением:

$$p = \frac{1}{2670} (\rho_{top}) t_{obs} + \frac{1}{2670} \int_0^L \Delta\rho(h) \left( \frac{R-h}{R} \right)^2 dh, \quad (7.1)$$

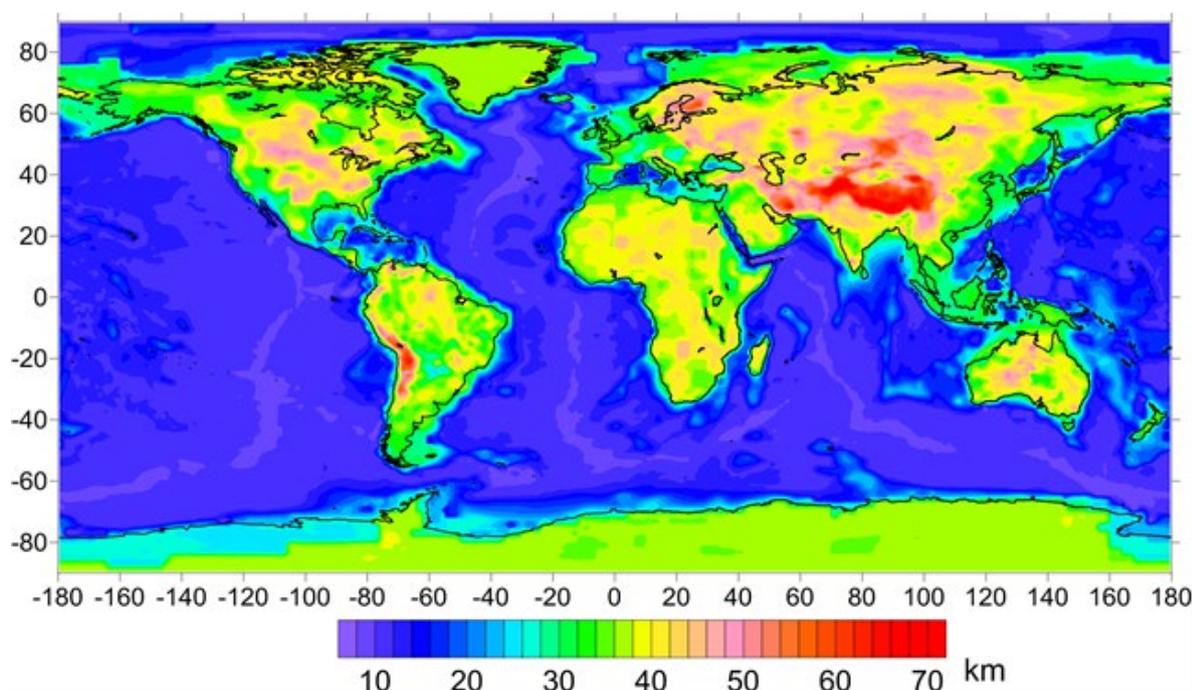
где  $\rho_{top}$  – эффективная плотность топографии;  $t_{obs} = 2,67$  г/м<sup>3</sup> для континентов и 0,92 г/м<sup>3</sup> для льда;  $h$  – глубина относительно поверхности геоида;  $\Delta\rho(h)$  – аномальная плотность коры, включая воду, относительно приведенной выше горизонтально однородной модели;  $L$  – нижняя граница, до которой рассматриваются аномалии плотности;  $R$  – средний радиус Земли.

Таким образом, остаточная топография зависит от плотности подкоровой части литосферы, которая может либо поддерживать литосферный блок в приподнятом состоянии (повышенное значение остаточной топографии соответствует пониженной плотности верхней мантии), либо затягивать его вниз подобно якорю, когда свойства литосферы противоположны. Кроме того, остаточная топография в отличие от мантийного гравитационного поля частично связана с воздействием мантийных движений (динамическая топография), хотя это влияние, по-видимому, существенно меньше эффекта верхнемантийных неоднородностей. Локальная часть остаточной топографии в значительной степени обусловлена нарушениями изостатического равновесия литосферы.

#### ***Глобальная модель глубин до границы Моховичича***

Информация о границе Мохо является ключевой для построения моделей Земли и изучения её динамики. Прямые данные о границе Мохо получаются в-основном с помощью сейсмических методов, таких как ГСЗ, изучение обменных волн и сейсмическая томография. Сбором и систематизацией таких данных занимаются несколько организаций в мире, среди них лидирующими являются Геологическая Служба США (USGS, Менло Парк) и Германский центр наук о Земле (GFZ, Потсдам).

Представленная в рамках исследования глобальная модель границы Мохо основана на работах, проводимых совместно в GFZ (Потсдам, Германия), USGS (Менло Парк, США) и ИФЗ РАН и ГЦ РАН (Москва), начиная с первой половины 1990-х. Основой модели является база сейсмических данных, собранная в USGS [Mooney, 2010]. Кроме того, использовались региональные модели, построенные в последние годы для Азии [Stolk et al., 2013], Ближнего Востока и Северной Африки [Kaban et al., 2016], Северной Америки [Tesauro et al., 2014], Австралии [Kennet et al., 2011], и Южной Америки [Assumpção et al., 2013]. В остальных регионах использовалась глобальная модель с более низким разрешением Crust1.0 [Laske et al., 2013].



**Рисунок 7.3 – Глобальная модель глубин до границы Мохоровичича от уровня моря**

Результирующая глобальная модель границы Мохо представлена на (рисунке 7.10). Глубины до границы Мохо меняются от 7 км в некоторых океанических районах до 70 км под Гималаями и Тибетом. С точки зрения последующего использования этой карты важно оценить ошибки определения глубин до подошвы коры. Ошибка в индивидуальной точке на сейсмическом профиле может составлять около 5% от полного значения, однако при анализе достаточно протяженных аномалий (например, с размером не менее 300–500 км для территории Северной Америки, рисунок 7.8), каждая из них как правило захватывает несколько независимых определений (если таковые вообще имеются), так что суммарная ошибка соответствующим образом уменьшается. В общем случае было принято, что в стабильных платформенных областях, в достаточной степени изученных сейсмическими методами (Северная Америка, Северная и Центральная Евразия, Австралия) ошибка определения глубины до границы Мохоровичича для достаточно крупных структур (что эквивалентно низкочастотному сглаживанию с граничной длиной волны около 500 км) не превышает 1 км. В орогенических районах эта ошибка может быть больше и составляет примерно 2 км. Снова подчеркнем, что данные оценки имеют отношение только к достаточно протяженным аномалиям, а индивидуальные погрешности могут быть существенно больше. В то же время, при анализе ограниченных (локальных) регионов основное значение имеют относительные вариации коровых границ, которые в общем определяются более надежно, чем абсолютные значения. Последние могут быть подвержены влиянию систематических эффектов, которые являются следствием особенностей применяемых интерпретационных методов. В пределах же конкретных

регионов профили ГСЗ обычно взаимно согласованы. В большей части океанов ошибка определения глубин до Мохо существенно меньше, так как океаническая кора в основном однородна.

Данные по остаточным мантийным аномалиям и модели глубин до границы Мохоровичича были оформлены в среде ГИС в виде отдельных слоев ГИС и включены в картографический сервис «Геофизика». Разрешение модели составляет 1 градус дуги. Зона покрытия – весь мир.

### **7.3 Модель палеотектонических реконструкций**

Другим важным сегментом БГД проекта являются данные по палеотектоническим реконструкциям. Палеотектонические реконструкции представляют собой один из основных методов изучения тектонических событий в пространстве и времени. Составление палеотектонических реконструкций необходимо как для проведения глобальных исследований, касающихся изучения геологического и тектонического развития нашей планеты в целом, так и для решения менее масштабных задач. Например, проведение совокупного анализа палеотектонических условий формирования участков с высокой нефтегазоносностью и их современного гипсометрического положения позволяет делать прогноз нефтегазоносности региона и послужить дальнейшей основой для реализации направленных геологоразведочных работ.

В связи с активным развитием компьютерных и ГИС-технологий и расширением сети наземных наблюдений, составление и визуализация палеотектонических реконструкций остается актуальным и фундаментальным направлением в современной геологии. Однако, несмотря на повышенный интерес к данной проблематике и многочисленные попытки создания единой модели, остается еще ряд вопросов, требующих решения.

В рамках выполнения работ по проекту был проведен аналитический обзор новейших литературных данных [Andrew et al., 2017; EarthByte, 2017] с целью проведения пространственно-временных палеотектонических реконструкций континентальных и океанических плит для дальнейшего выявления особенностей тектонического развития Земли. Таким образом, для достижения данной цели была осуществлена разработка динамического контента, отражающего движение литосферных плит с последующим использованием сферических технологий визуализации и ГИС. В настоящее время существует ряд моделей, описывающих движения материков. Так, например, различия моделей для мезозойской и кайнозойской эр несущественны, в то время как для более древних времен, в частности для неопротерозоя, отличия весьма значительны.

В качестве основы для изучения и дальнейшей визуализации, авторы приняли топологическую модель, синтезированную группами австралийских ученых на основе имеющихся геологических и палеомагнитных данных [Andrew et al., 2017; EarthByte, 2017] и представленные на ресурсе EarthByte [2018]. Модель отображает эволюцию конфигураций тектонических плит за период 1000–520 млн. лет.

В указанный временной период – неопротерозое – доминировало образование суперконтинента Родиния, с ее распадом и последующим образованием Гондваны. Кроме того, неопротерозой характеризуется как бурный период в истории Земли с большими климатическими вариациями, возникновением новых сложных форм жизни.

К рубежу в 1000 млн. лет уже были сформированы фрагменты древнейших протоконтинентов – кратонов. В частности, были сформированы существенные части щитов Индии, Северного Китая и Южной Америки. Ядро континентальной части Европы также сформировалось во время протерозойской эры путем объединения трех кратонов в единый континент Балтика: Фенноскандии, занимающей территорию Балтийского щита, сформировавшегося в архейское время, Волго-Уральского (бассейн реки Волги) и Сарматского, на территории Украины, Молдавии и прилегающей части Румынии. Объединения описанных трёх кратонов закончилось к концу палеопротерозоя – 1600 млн. лет назад. Протерозойское происхождение имеет и континентальное ядро Индии, сформировавшееся в результате объединения четырёх кратонов.

Синтезированные в рамках работ над моделью все имеющиеся геологические и палеомагнитные данные позволили построить топологическую модель неопротерозоя [Andrew et al., 2017], которая отображает эволюцию конфигураций тектонических плит за это время. Так, например, было выявлено и подтверждено существование континентов и зон океанической субдукции на протяжении всего геологического времени. Это подтверждается проявлениями либо в виде протолитов из вулканической дуги, которые аккрецируются на континенте, либо в зонах столкновения континентов и дуг, либо в качестве детрита этих вулканических дуг, сохранившихся в виде реликтов. Несмотря на это, авторы данной модели обнаруживают, что представленная ими модель все еще предсказывает меньшую субдукцию, чем настоящее время, что указывает на то, что интенсивность субдукции, вероятно, недооценена, к примеру, из-за отсутствия сохранения геологических данных. Кроме того, данная модель представляет некоторые заметные отклонения от предыдущих моделей Родинии. Авторы полностью исключают Индию и Южный Китай из Родинии из-за долговременной субдукции, сохранившейся на краю Индии и противоречивых палеомагнитных данных.

Исходные данные за период 1000–520 млн. лет, загруженные с ресурса «EarthByte»,

представляют собой архив, содержащий набор файлов в формате «.gpml». Для их отображения и последующего экспорта в форматы, совместимые с программными компонентами программного пакета ESRI ArcGIS, использовалось программное обеспечение GPLates [2018]. GPLates – это комбинация интерактивной реконструкции тектоники плит, функциональности географических информационных систем, а также визуализации растровых данных. Данная программа позволяет отображать реконструкции тектоники плит и связанными с ними данными через геологическое время. Подобные реконструкции представляют собой расчет возможных положений, ориентаций и движений тектонических плит во времени, основанный на относительном положении плит в разное время в прошлом.

Для дальнейшей работы по обработке и оформлению имеющихся данных было принято решение использовать компоненты ПО ESRI ArcGIS. Данные модели движения тектонических плит, а именно реконструкции геометрии, были экспортированы с шагом 1 млн. лет в формат «.shp», поддерживаемый ArcGIS. За период 1000–520 млн. лет помимо данных о форме и расположении тектонических плит имеются дополнительные сведения о линиях конвергенции, дивергенции и трансформации. Созданный ГИС-проект содержит 482 слоя в системе координат WGS84 с единой легендой и цветовым оформлением, позволяющими сопоставлять данные между собой при визуальном анализе.

Для визуализации на сфере данные были дополнительно экспортированы в изображения в формате «.png» с соотношением сторон 2:1 (размер изображения 4096×2048), а также с соотношением сторон 4:3 в системе координат проекции Cube (размер изображения 4096×3072). Проекция Cube используется для улучшения качества изображения на полюсах. Пример отображения в программе Orbus [Rybkina et al., 2015] представлен на (рис. 7.4).

Таким образом, авторами представлена непрерывная глобальная модель для периода неопротерозоя с эволюционирующими границами плит, обеспечивающая основу для глубинного моделирования Земли, служащая основой для будущих доработок и усовершенствований.



вспомогательные приложения, которые выполняют определенную функцию. То есть отсутствует необходимость создавать множество новых приложений для взаимодействия с данными, поскольку они уже встроены в систему. Необходимо лишь в конструкторе добавить те, которые нужны для конкретной задачи. Если необходимый виджет отсутствует, то необходимо программировать новый инструмент или делать импорт из настольных ГИС-приложений.

Встроенный набор виджетов позволяет выполнять большой спектр задач: добавление слоев данных, их анализ, построение диаграмм, редактирование слоев в этом приложении и др. В ходе дальнейшей работы по проекту планируется расширение функционала приложения за счет включения новых инструментов работы с геопространственными данными.

#### **Список использованных источников**

Кабан М.К. Плотностные неоднородности верхней мантии, изостазия литосферы и геодинамика: диссертация ... доктора физико-математических наук: 25.00.10. М., 2003.

Красноперов Р.И., Соловьёв А.А. (2015), Аналитическая геоинформационная система для комплексных геолого-геофизических исследований на территории России, *Горный журнал*, № 10, сс. 89–93, doi: 10.17580/gzh.2015.10.16

Красноперов Р.И., Соловьёв А.А., Николов Б.П., Жарких Ю.И., Груднев А.А. (2016), Интерактивное веб-приложение для комплексного изучения пространственной информации по наукам о Земле с использованием базы геоданных ГЦ РАН, *Исследования по геоинформатике*, Т. 4, № 1 BS4015, doi: 10.2205/2016BS039

Соловьёв А.А., Красноперов Р.И., Николов Б.П., Жарких Ю.И., Агаян С.М. (2018) Веб-ориентированный программный комплекс для анализа пространственных геофизических данных методами геоинформатики, *Исследование Земли из космоса*, № 2, сс. 65–76, doi: 10.7868/S0205961418020070

ArcGIS. WebAppBuilder for ArcGIS. [Электронный ресурс]. <https://doc.arcgis.com/ru/web-appbuilder/create-apps/what-is-web-appbuilder.htm> (дата обращения: 26.11.2018).

Assumpção M., Feng M., Tassara A., Julià J. (2013), Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave tomography, *Tectonophysics*, Vol. 609, pp. 82–96.

Beriozko A., Lebedev A., Soloviev A., Krasnoperov R., Rybkina A. (2011), Geoinformation system with algorithmic shell as a new tool for Earth sciences, *Russian Journal of Earth Sciences*, Vol. 12, No. 1, ES1001, doi: 10.2205/2011ES000501

Christensen N.I., Mooney W.D. (1995), Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, B, pp. 9761–9788.

EarthByte [Электронный ресурс]. <https://www.earthbyte.org/global-plate-models> (дата обращения: 06.11.2018).

Еххон. Tectonic map of the world. – USA: Am. Assoc. Petrol. Geologists, Tulsa, 1985. – p. 16.

GPlates [Электронный ресурс]. <https://www.gplates.org/> (дата обращения: 06.11.2018).

Kaban M.A (2001), Gravity Model of the North Eurasia Crust and Upper Mantle: 1. Mantle and Isostatic Residual Gravity Anomalies, *Russian Journal of Earth Sciences*, Vol. 3, No. 2, pp. 25–144, doi: 10.2205/2001ES000062

Kaban M.K., El Khrepy S., Al-Arifi N., Tesauro M., Stolk W. (2016), Three-dimensional density model of the upper mantle in the Middle East: Interaction of diverse tectonic processes, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 121, doi: 10.1002/2015JB012755

Kaban M.K., Schwintzer P., Artemieva I.M., Mooney W.D. (2003), Density of the continental roots: compositional and thermal contributions, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 209, pp. 53–69.

Kaban M.K., Stolk W., Tesauro M., El Khrepy S., Al-Arifi N., Beekman F., Cloetingh S.A.P.L. (2016), 3D density model of the upper mantle of Asia based on inversion of gravity and seismic tomography data, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 17, doi: 10.1002/2016GC006458

Kennett B.L.N., Salmon M., Saygin E., Group A.W. (2011), AusMoho: the variation of Moho depth in Australia, *Geophysical Journal International*, Vol. 187, No. 2, pp. 946–958.

Laske G., Masters G., Ma Z., Pasyanos M. (2013), Update on CRUST1.0–A 1-degree global model of Earth’s crust, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 15, p. 2658.

Merdith A.S., Collins A.S., Williams S.E., Pisarevsky S., Foden J.D., Archibald D.B., Blades M.L., Alessio B.L., Armistead S., Plavsa D., Clark C., Müller R. (2017), A full-plate global reconstruction of the Neoproterozoic, *Gondwana Research*, Vol. 50, pp. 84–134.

Mooney W.D. (2010), Crust and Lithospheric Structure–Global Crustal Structure, *Seismology and Structure of the Earth: Treatise on Geophysics*, No. 1, p. 361.

Mooney W.D., Kaban, M.K. (2010), The North American Upper Mantle: Density, Composition, and Evolution, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, B12424, doi: 10.1029/2010JB000866

Nikolov B.P., Zharkikh J.I., Soloviev A.A., Krasnoperov R.I., Agayan S.M. (2015), Integration of data mining methods for Earth science data analysis in GIS environment, *Russian Journal of Earth Sciences*, Vol. 15, No. 4, ES4004, doi: 10.2205/2015ES000559

Rabbel W., Kaban M., Tesauro M. (2013), Contrasts of seismic velocity, density and strength across the Moho, *Tectonophysics*, Vol. 609, pp. 437–455.

Rybkina A.I., Bobkov A.E., Nikiforov O.V., Pyatygina O.O. (2015), Hardware and software system for visualization of geophysical data on a spherical screen, *Scientific Visualization*, Vol. 7, No. 2, pp. 38–49.

Soloviev A.A., Zharkikh J.I., Krasnoperov R.I., Nikolov B.P., Agayan S.M. (2016), GIS-oriented solutions for advanced clustering analysis of geoscience data using ArcGIS platform, *Russian Journal of Earth Sciences*, Vol. 16, No. 6, ES4004, doi: 10.2205/2016ES000587

Stolk W., Kaban M.K., Beekman F. Tesauro M., Mooney W.D., Cloetingh S.A.P.L. (2013), High resolution regional crustal models from irregularly distributed data: Application to Asia and adjacent areas, *Tectonophysics*, 2013, Vol. 602, pp. 55–68.

Tesauro M., Kaban M.K., Mooney W.D., Cloetingh S. (2014), NACr14: A 3D model for the crustal structure of the North American Continent, *Tectonophysics*, Vol. 631, pp. 65–86, doi: 10.1016/j.tecto.2014.04.016

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

**Номер регистрации в ИС Минобрнауки: 0145-2018-0006**

**Номер госрегистрации: АААА-А18-118021990124-0**

**Руководитель: академик РАН А. Д. Гвишиани**

**Отв. исполнитель: А. А. Одинцова**

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

### **8.1. Принципы работы с данными ГИС-проекта “ROSA”**

Главная цель создания многокомпонентного научного продукта “ROSA” – проведение масштабного аналитического исследования с целью оценки уровня развития нефтегазовой отрасли как внутри отдельных стран, так и в мире в целом. Необходимым условием для проведения подобных глобальных исследований являются верифицированные исходные данные. Наиболее удобным и эффективным способом хранения данных являются базы данных, поэтому разработка и поддержка верифицированных баз данных является одним из приоритетных направлений в развитии геоинформатики.

Однако прежде чем подойти к вопросу проработки идеи создания тематически ориентированной базы данных, авторами был решен ряд задач, касающихся непосредственно самих данных – их поиска, сбора, систематизации, хранения и управления с целью дальнейшего проведения аналитических исследований. В случае нашего проекта, данные являются неким стратегическим активом. Поэтому особенно важно утвердить ряд принципов, которые позволят организовать методический процесс извлечения и систематизации нужных данных. Этот процесс должен иметь четкие этапы с полным пониманием требований к получаемым результатам. Одним из инструментов, позволяющих его организовать является *системный анализ*, методы и подходы которого были применены при сборе данных, их интеграции и утверждении структуры базы данных “ROSA”, а также для проведения дальнейших аналитических исследований.

Одной из основных трудностей является *низкая доступность данных*. Это

объясняется спецификой данных и их секретностью, особенно в случае стран Ближнего и Среднего Востока. Таким образом, это является серьезным препятствием для сбора данных в этой области, ввиду чего некоторые поля атрибутивных таблиц могут быть не в полной мере представительными, а иногда и вовсе остаются пустыми.

Кроме того, в ходе поиска и сбора данных необходимо вести тщательный контроль над достоверностью данных. Разумеется, все представленные данные не могут быть абсолютно точными и достоверными – случается, что источники включают в себя ошибочную информацию или даже противоречивую, что обнаруживается уже на этапе аналитической проработки интегрируемых данных. Поэтому *одним из важнейших принципов* при работе с данными является обязательное наличие ссылок на все используемые источники данных для верификации и последующих работ с базой данных.

Именно поэтому атрибутивные таблицы каждого месторождения представленной базы данных “ROSA” имеют ссылку на первоисточник. Создание и поддержка некоего *библиографического резюме* свидетельствует о надежности предоставляемых данных, и может служить инструментом проверки для дальнейшего анализа и прочих работ с базой данных – ее расширением и развитием.

Еще одна проблема заключается в интеграции данных, поскольку все необходимые данные поступают из разных источников (российских и/или зарубежных) в различных форматах и стандартах. Так, например, наряду с традиционным текстовым материалом в виде статей, справочников, производственных отчетов и пр., естественнонаучные данные зачастую могут быть представлены в виде графических материалов – карт, диаграмм и т. д. Особое внимание уделяется приведению данных к одному стандарту, так как существует значимое количество различий между российской и зарубежной терминологией.

Следовательно, все используемые в проекте “ROSA” данные должны иметь надлежащую модель систематизации, согласно которой данные должны сравниваться с единой точки зрения для их дальнейшего слияния и согласования внутри системы.

Переходя к организации хранения данных, в частности, к работе над структурой базы данных, также имеет место применение ряда принципов, так как само аккумулирование данных не является конечной целью, а является лишь одним из инструментов для проведения дальнейших аналитических исследований. И именно правильная систематизация данных с последующей визуализацией позволят представить данные в максимально доступном для анализа виде.

Для решения данной задачи использовались *методы и принципы системного анализа*. Ввиду чего структура базы данных была организована как многомерная и многоуровневая, что подробно будет описано в следующей главе.

## 8.2 Структура базы данных “ROSA”

Первым шагом при составлении базы данных, объектами которой стали крупнейшие месторождения нефти и газа России и мира, открытые в 20-21 вв., стал литературный обзор, а также аналитическая проработка более 500 открытых специализированных российских и зарубежных библиографических источников: справочники по нефтяным и газовым месторождениям; монографии; статьи в специализированных профильных журналах и сборниках тезисов конференций; энциклопедии и энциклопедические словари; отчеты стратегических исследовательских центров, профильных лабораторий, министерств, коммерческих нефтяных и газовых компаний; диссертации специалистов в нефтегазовой отрасли; материалы открытых интернет-источников (сайты нефтедобывающих компаний, академические профильные словари и пр.).

В результате было составлено библиографическое резюме, куда вошли все использованные для проекта источники данных. Предварительный анализ перечня верифицированных источников позволил составить список из крупнейших месторождений нефти и газа всего мира, который далее использовался как основа.

Еще на этапе поиска и сбора данных стало понятно, что все они делятся на два типа – статические и динамические. К статическим элементам данных относятся характеристики месторождений, постоянные во времени, к динамическим – изменяющиеся во времени. Таким образом, внутренняя структура базы данных разделилась на два блока:

- статические: *название месторождения; координаты; местоположение; тип залежей; даты открытия и ввода месторождения в эксплуатацию; данные о коллекторе (возраст и состав); плотность нефти; разрабатывающее предприятие; количество запасов;*
- динамические: *методы добычи; технологии добычи; технологические особенности; дебит скважин.*

В ходе работ по этапу структура базы данных развивалась и совершенствовалась [Одинцова и др., 2017; Odintsova et al., 2018]. Так, например, в блок статических данных были добавлены новые поля атрибутивные таблицы: «*дополнительная информация*» и «*ключевые слова*».

Поле «*дополнительная информация*» может включать в себя любую сопутствующую информацию по каждому месторождению. Это могут быть данные о сложности освоения или влиянии разработки месторождения на экологическую ситуацию местности, факты об экономических и социальных показателях и т. д. Все то, что вызывает интерес и может качественно дополнить аналитический обзор не только по одному

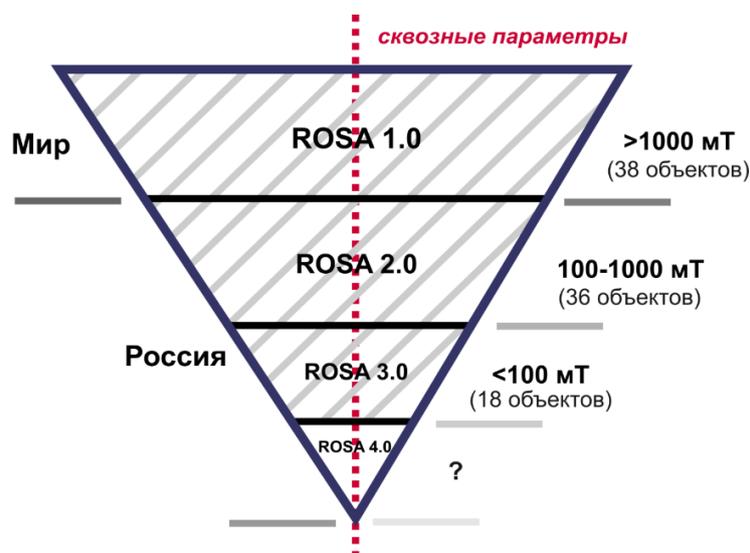
конкретному месторождению или региону, но и по стране и миру в целом.

Поле «ключевые слова» является неотъемлемым элементом для работы с большим количеством разнородной информации и позволяет существенно упростить процесс ее дальнейшей обработки.

Изменение динамических параметров проводится с интервалом в 1 год при этом статические параметры остаются неизменными.

Общую структуру базы данных “ROSA” можно охарактеризовать как многомерную и многоуровневую, и представить ее в виде трех уровней – “ROSA 1.0”, “ROSA 2.0”, “ROSA 3.0”. Предлагаемая на рисунке 8.1 блок-схема представляет взаимодействие всех уровней базы данных “ROSA”. Принцип перевернутой пирамиды применяется по географическому покрытию, а также по объему запасов. Подобный принцип организации данных универсален и может быть применен к другим тематическим базам данных, при этом все уровни базы могут анализироваться независимо друг от друга. Кроме того, каждый уровень оснащен унифицированными сквозными параметрами, что позволяет проводить сравнительный аналитический обзор всех уровней одновременно.

Первый информационный уровень “ROSA 1.0” содержит в себе статические и динамические данные по крупнейшим месторождениям нефти и газа России и других стран мира с запасами более 1000 млн тонн нефти и 1000 м<sup>3</sup> газа, поиск и ввод в эксплуатацию которых пришелся на 20 век. Второй и третий информационные уровни “ROSA 2.0” и “ROSA 3.0” включают в себя данные по крупнейшим стратегически важным месторождениям углеводородов России за 20 и 21 века. Так, в “ROSA 2.0” вошло 36 объектов с запасами от 100 до 1000 млн тонн, а в “ROSA 3.0” 18 объектов с запасами от 50 до 100 млн тонн. “ROSA 4.0” может содержать в себе менее масштабные по запасам месторождения или, например, узконаправленную информацию и в настоящее время находится в разработке.



**Рисунок 8.1 – Модель представления структуры многоуровневой базы данных “ROSA”, базирующаяся на принципе перевернутой пирамиды**

Другой инструмент, которым оснащена база данных – наличие сквозных параметров, которые обеспечивают эффективную навигацию внутри всех блоков и уровней, а также облегчают процесс обработки большого объема разнородных данных как в числовом, так и текстовом форматах.

Таким образом, база данных “ROSA”, является ключевым элементом проекта и отражает всю информацию, необходимую для дальнейшего анализа промышленной и экономической трансформации как внутри нашей страны, так и в мире в целом.

### **8.3. ГИС-проект “ROSA”**

Следующим этапом проекта стала визуализация контента БД, реализуемая в среде Esri ArcGIS. В результате, все месторождения вместе со всей сопутствующей информацией были представлены в виде геопространственных объектов, отображенных на единой карте, снабженной инструментами работы с данными.

#### **8.3.1. Визуализация базы данных в среде Esri ArcGIS**

Для дальнейшей обработки базы данных использовался один из компонентов платформы ArcGIS – ArcMap, который является центральным приложением, используемым в ArcGIS. ArcMap представляет геоданные в виде набора слоёв и прочих элементов в виде карты.

Исходная информация, представляющая собой три таблицы в формате «.xls», была добавлена в ArcMap без дополнительных преобразований. Для дальнейшей визуализации данных к загруженным таблицам применялась операция «Отобразить данные XY» («Display XY Data»). В появившемся окне были выбраны поля, которые соответствуют осям

X и Y, а также выбрана проекция для отображения в ArcMap.

Полученный набор точечных элементов для каждой таблицы (“ROSA 1.0”, “ROSA 2.0” и “ROSA 3.0”) экспортирован в шейп-файл («.shp») и нанесен на карту в виде слоя (рис. 8.2). Вся исходная атрибутивная информация сохранена в шейп-файлах. В качестве базовой подложки выступает карта World Imagery (Esri, DigitalGlobe и др.), которая представляет собой спутниковые и аэрофотоснимки с разрешением 1 метр и более в разных частях мира, а также спутниковые снимки с более низким разрешением для всего мира.

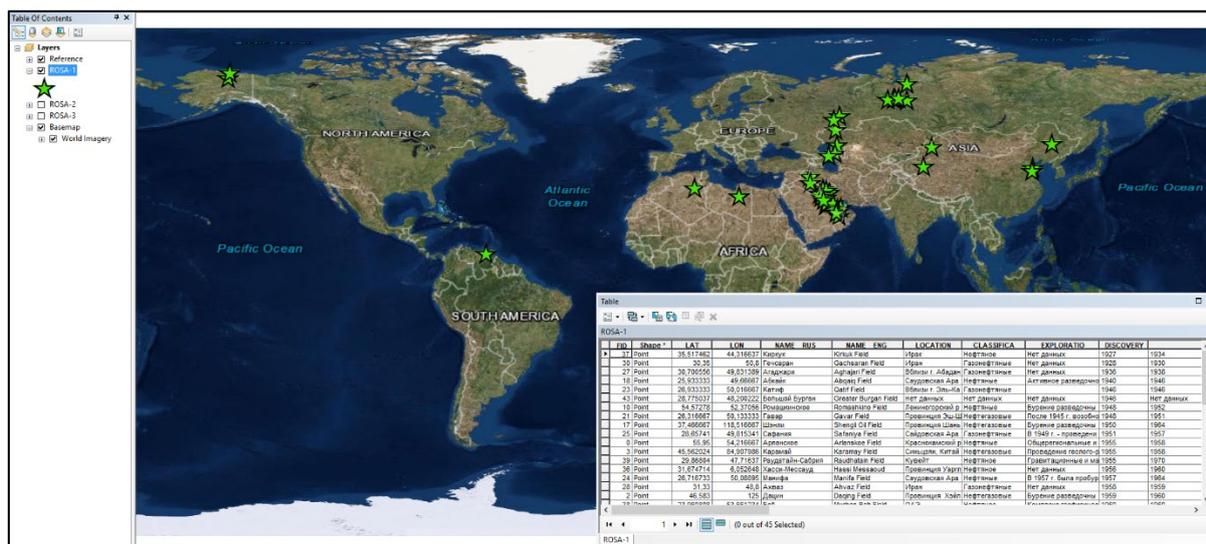
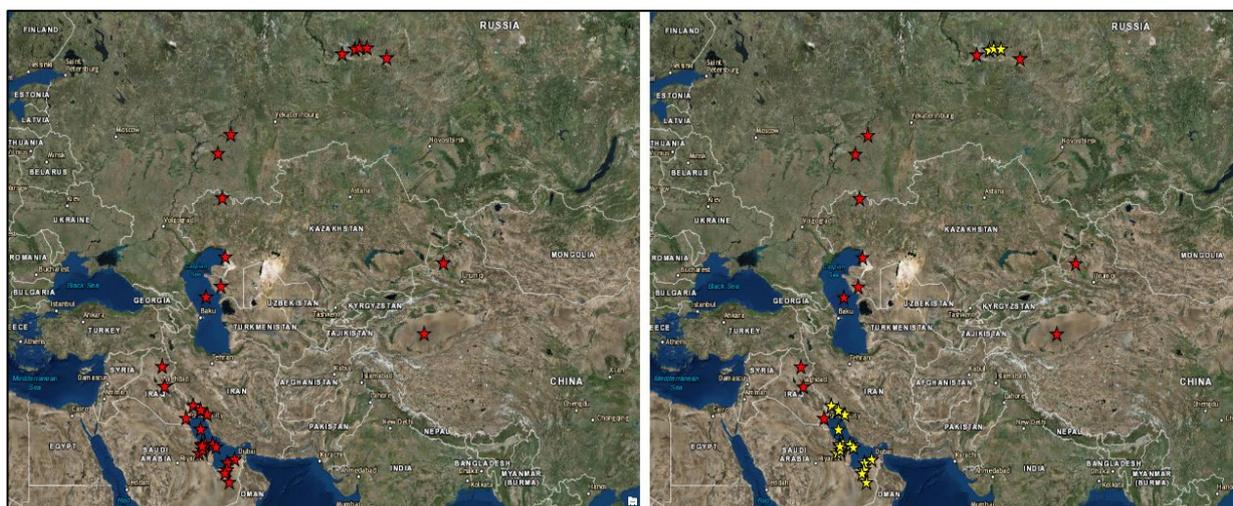


Рисунок 8.2 – База данных “ROSA 1.0” в виде шейп-файла в среде ArcGIS (проекция фрейма данных – WGS-84)

#### 8.4. Инструменты анализа данных

В качестве одного из методов, примененных к данным базы ROSA является алгоритм DPS (Discrete Perfect Sets) [Агаян и др., 2011]. Данный метод создан в Геофизическом центре РАН в качестве нового способа анализа дискретных данных и является частью дискретного математического анализа. Основная идея алгоритма DPS заключается в выделении в конечном множестве  $X$  плотных областей с некоторым уровнем плотности  $\alpha$ , который принадлежит отрезку  $[0, 1]$ . Имеются два параметра, которые пользователь может изменять:  $\omega$  ( $\omega < 0$ ) для нахождения радиуса близости и  $\beta \in [-1, 1]$ , который необходим для вычисления уровня плотности.

В среде ArcGIS алгоритм DPS представляет собой инструмент геообработки, представляющий собой инструмент-скрипт [Nikolov et al., 2015; Soloviev et al., 2016]. Результат работы метода представлен на рисунке 8.3 и фиксируют области наибольшего скопления месторождений нефти и газа на территории стран.



**Рисунок 8.3 – Исходные данные ROSA-1 (слева) и результат работы алгоритма DPS (справа, элементы выделены желтым цветом)**

Таким образом, взаимодействие всех элементов многокомпонентного ГИС-проекта “ROSA” с унифицированными идентификаторами для многомерной и многоуровневой базы данных обеспечит проведение комплексных исследований по развитию и становлению нефтегазовой отрасли как в отдельных странах, так и в мире в целом. Соответствующие алгоритмы позволят провести аналитический анализ становления отрасли и выделить страны-лидеры, в том числе в ретроспективе, для оценки их позиций на мировой экономической арене.

#### **Список использованных источников**

Одинцова А. А., Гвишиани А. Д., Рыбкина А. И., Самохина О. О., Астапенкова А. А., Фирсова Е. Ю. (2017), Динамика развития нефтегазовой отрасли в 20 веке на примере крупнейших месторождений мира: ГИС-проект и вебсервис (Части I, II) // Геоинформатика, № 4. С. 2–6.

Nikolov B. P., Zharkikh J. I., Soloviev A. A., Krasnoperov R. I., Agayan S. M. (2015), Integration of data mining methods for Earth science data analysis in GIS environment // Russian Journal of Earth Sciences, Vol. 15, No. 4, ES4004. DOI: 10.2205/2015ES000559.

Odintsova A., Gvishiani A., Nakicenovic N., Rybkina A., Busch S., Nikolova J. (2018), The world’s largest oil and gas hydrocarbon deposits: ROSA database and GIS project development // Russian Journal of Earth Sciences, Vol. 18, ES3002, DOI: 10.2205/2018ES000621.

Soloviev A. A., Zharkikh J. I., Krasnoperov R. I., Nikolov B. P., Agayan S. M. (2016), GIS-oriented solutions for advanced clustering analysis of geoscience data using ArcGIS platform // Russian Journal of Earth Sciences, Vol. 16, No. 6, ES4004, DOI: 10.2205/2016ES000587.

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

**Номер регистрации в ИС Минобрнауки: 0145-2018-0004**

**Номер госрегистрации: АААА-А18-118021990125-7**

**Руководитель: академик РАН А.Д. Гвишиани**

**Ответственный исполнитель: к.ф.-м.н. Б.А. Дзэбоев**

Настоящий отчет является заключительным по теме «Разработка аналитической геоинформационной системы для формирования базы данных и цифровых карт для исследования месторождений стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации». Исследование выполнялось в рамках реализации мероприятий Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 48 «Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения».

В 2018 г. исследовательские работы велись по следующим основным направлениям:

- совершенствование веб-ориентированного программного комплекса для анализа пространственных геофизических данных методами геоинформатики;
- построение карт гравитационного поля высокого разрешения;
- построение карт изостатических аномалий гравитационного поля высокого разрешения;
- разработка алгоритма контекстной агломеративной иерархической кластеризации.

### **9.1. Веб-ориентированный программный комплекс для анализа пространственных геофизических данных методами геоинформатики**

В Геофизическом центре РАН создается веб-ориентированный программный комплекс, объединяющий в ГИС-среде обширную базу геопространственных данных по наукам о Земле и пополняемый каталог инструментов их анализа [*Beriozko et al., 2011; Krasnoperov and Soloviev, 2015; Soloviev et al., 2016*]. Предложенный подход обладает следующими преимуществами:

- открытый сетевой доступ к базе геоданных и инструментам обработки на серверной стороне;
- доступ к большим массивам геоданных, которые затруднительно передавать по сети и обрабатывать на стороне клиента из-за их существенных объемов;

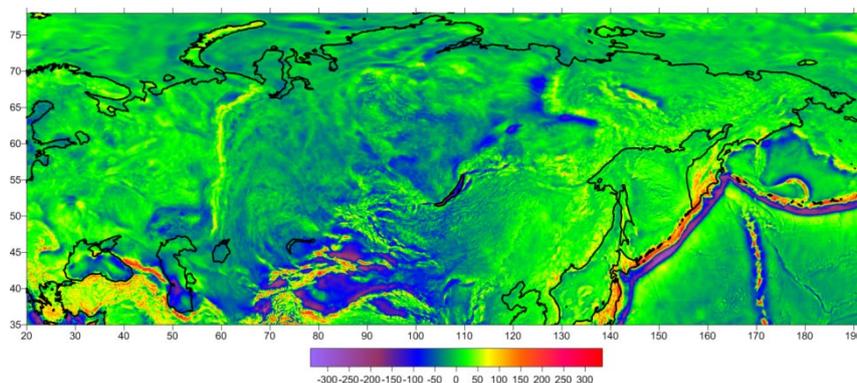
- постоянно пополняемый набор алгоритмов с их детальным описанием;
- эффективное использование сложных аналитических процедур обработки без использования мощных вычислительных ресурсов с минимальными требованиями к клиентскому ПО.

Важнейшим свойством создаваемого комплекса является его аналитическая компонента. Она представлена в виде расширяемой базы алгоритмов интеллектуального анализа данных, интегрированных в среду ГИС и опубликованных в качестве инструментов геообработки. Основу базы составляют алгоритмы топологической фильтрации и кластерного анализа пространственных геолого-геофизических данных, основанные на дискретном математическом анализе (ДМА).

## **9.2. Гравитационное поле высокого разрешения (аномалии в свободном воздухе, аномалии Буге и вертикальные градиенты), полученные по результатам совместной интерпретации данных спутниковых и наземных наблюдений**

### **9.2.1. Аномалии в свободном воздухе**

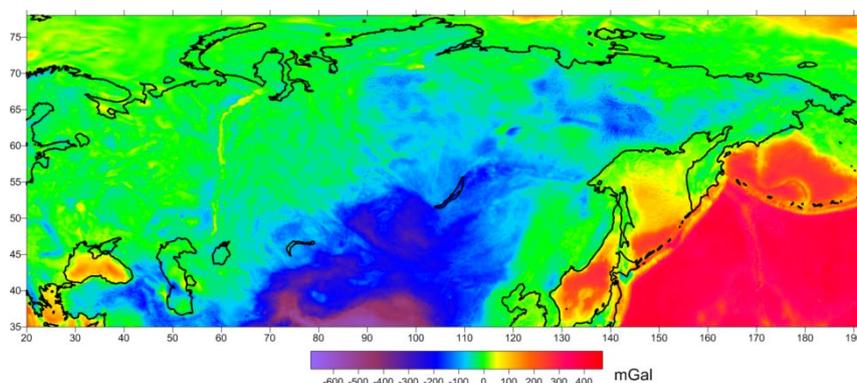
Спутниковые наблюдения (прежде всего с использованием миссий CHAMP, GRACE и GOCE) открыли новую эру в построении моделей гравитационного поля. С их помощью впервые удалось построить самосогласованные глобальные модели. Спутниковые данные обеспечивают региональную часть (примерно до 240 гармоник сферического разложения), в то время как наземные наблюдения обеспечивают высокочастотную составляющую. EIGEN-6C4 является наиболее разработанной на данный момент моделью, которая создавалась в Немецком Центре Наук о Земле (GFZ, Potsdam), который разработал и выполнил миссию CHAMP, а впоследствии стал одним из основателей миссий GRACE и GOCE (совместно с JPL и NASA) [Förste *et al.*, 2008, 2014A,B]. Наряду с новыми спутниковыми данными, в модель вошли также недоступные до недавнего времени данные наземных наблюдений. Итоговые аномалии в свободном воздухе показаны на рисунке 9.1. По сравнению с версией 2013 года территория расширена до 20° – 193° ВД и 35° – 78° СШ. Таким образом, эта область полностью включает территорию России, а также значительные сопредельные территории. Разрешение поля составляет 5×5', что соответствует максимальному разрешению модели EIGEN-6C4 (2 190 гармоник сферического разложения [Förste *et al.*, 2014A,B]). В геодезическом смысле данные аномалии представляют «возмущения» гравитационного поля (gravity disturbances). По сравнению с традиционными аномалиями в них учтен эффект ундуляций геоида относительно референц эллипсоида. Такие аномалии наилучшим образом подходят для изучения строения Земли.



**Рисунок 9.1 – Аномалии в свободном воздухе (gravity disturbances). Модель EIGEN-6C4 [Förste et al., 2014A,B]. Указаны значения в мГал**

### 9.2.2. Аномалии Буге

Аномалии Буге представляют аномалии гравитационного поля, из которых устранен эффект топографии на суше и эффект воды в акваториях. Таким образом, они напрямую отображают плотностные неоднородности внутри Земли и поэтому являются одной из важнейших редукций гравитационного поля. Топография и батиметрия, которые использовались при расчетах аномалий Буге взята на основании модели ETOPO-1 [Amante and Eakins, 2008]. При расчетах в континентальной части использовалось значение плотности  $2,67 \text{ г/см}^3$ , а плотность воды в океане принята равной  $1,03 \text{ г/см}^3$ . Таким образом, эффективная отрицательная плотность водного слоя составила  $-1,64 \text{ г/см}^3$ . Рассчитанные аномалии показаны на рисунке 9.2.

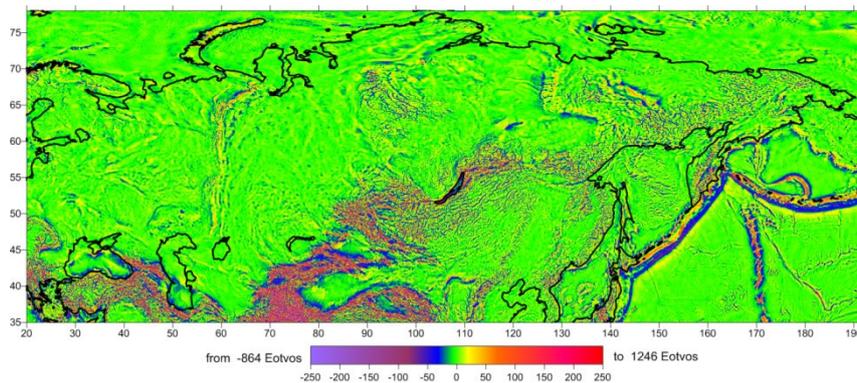


**Рисунок 9.2 – Аномалии Буге, полученные после устранения эффекта топографии и водного слоя из аномалий в свободном воздухе**

### 9.2.3. Вертикальные градиенты гравитационного поля

В последние годы благодаря спутнику GOCE впервые удалось построить консистентную глобальную модель полного тензора градиентов гравитационного поля [Förste et al., 2014A,B]. На борту этого спутника, находившегося на орбите с 2009 по 2013 гг., находились 6 градиентометров, которые непрерывно осуществляли измерение

градиентов гравитационного поля. В сочетании с данными о положении и скорости спутника, эти данные позволили создать глобальную модель градиентов с разрешением до 240 гармоник сферического разложения. Для вертикальной составляющей градиента гравитационного поля ( $G_{zz}$ ) удалось кардинально повысить разрешение (до 2190 гармоник сферического разложения) за счет использования данных наземных измерений, аэрогравиметрии и альтиметрических данных в океанических районах [Förste et al., 2014A,B]. Итоговая модель (EIGEN-6C4) показана на рисунке 9.3. Как видно из рисунка аномалии вертикального градиента гравитационного поля тесно связаны с границами блоков земной коры, в частности, с разломами.



**Рисунок 9.3 – Вертикальные градиенты гравитационного поля. Модель EIGEN-6C4 [Förste et al., 2014A,B]. Указаны значения в этвеш**

### **9.3. Изостатические аномалии гравитационного поля высокого разрешения (территория Северной Евразии)**

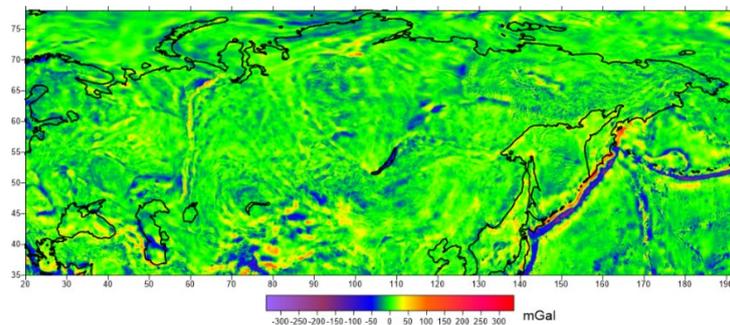
Изостатические аномалии силы тяжести представляют разность наблюдаемого гравитационного поля и гравитационного эффекта, создаваемого изостатически скомпенсированной литосферой. Предполагается, что сумма аномальных масс в каждой литосферной колонке выше некоторого уровня, называемого уровнем изостатической компенсации, равна нулю. Таким образом, задача расчета изостатических аномалий силы тяжести сводится к построению изостатически скомпенсированной плотностной модели коры и верхней мантии и устранению гравитационного эффекта этой модели из наблюдаемого гравитационного поля.

В данном исследовании была использована модель коры, полученная в недавних исследованиях [Stolk et al., 2013; Tesauero et al, 2008]. Эта модель включает в себя данные о глубинах до фундамента (мощность осадочного чехла), глубины до границы Мохоровичича, а также средние (по вертикали) значения плотности в осадочном чехле и консолидированной коре. Эта модель была дополнена вариациями плотности в верхней мантии (её литосферной части), которые обеспечивают изостатическое равновесие каждой

литосферной колонки относительно друг друга. Таким образом, данная изостатическая модель включает реальные данные о строении коры. Это поле было вычтено из поля аномалий Буге, что позволило получить изостатические аномалии гравитационного поля.

Полное поле изостатических аномалий всё еще содержит эффекты глубинных плотностных неоднородностей и динамических возмущений, связанных с воздействием мантийной конвекции. Было показано [Kaban *et al.*, 2004; Кабан, 2003], что связанные с этими факторами аномалии проявляются только в длинноволновой части поля. В то же время, поле «истинных» изостатических аномалий, связанных с плотностными неоднородностями литосферы, не содержит длинноволновой составляющей, так как все крупные блоки литосферы изостатически скомпенсированы и не могут поддерживаться за счет напряжений в ней. Это позволяет эффективно разделить глубинную и литосферную части изостатических аномалий посредством фильтрации. Было показано, что наиболее приемлемым для данных целей является фильтр гауссового типа с граничной длиной волны 2400 км [Kaban *et al.*, 2004; Кабан, 2003]. В результате было рассчитано поле, обусловленное влиянием глубинных факторов.

После удаления длинноволновой составляющей из полного поля изостатических аномалий была получена литосферная часть изостатических аномалий, которые в определяющей степени обусловлены плотностными неоднородностями верхней части коры и нарушениями изостазии литосферы (рисунок 9.4).



**Рисунок 9.4 – Региональная и локальная части изостатических аномалий силы тяжести, обусловленная плотностными неоднородностями верхней части коры и нарушениями изостазии литосферы**

#### **9.4. Контекстный алгоритм агломеративной иерархической кластеризации**

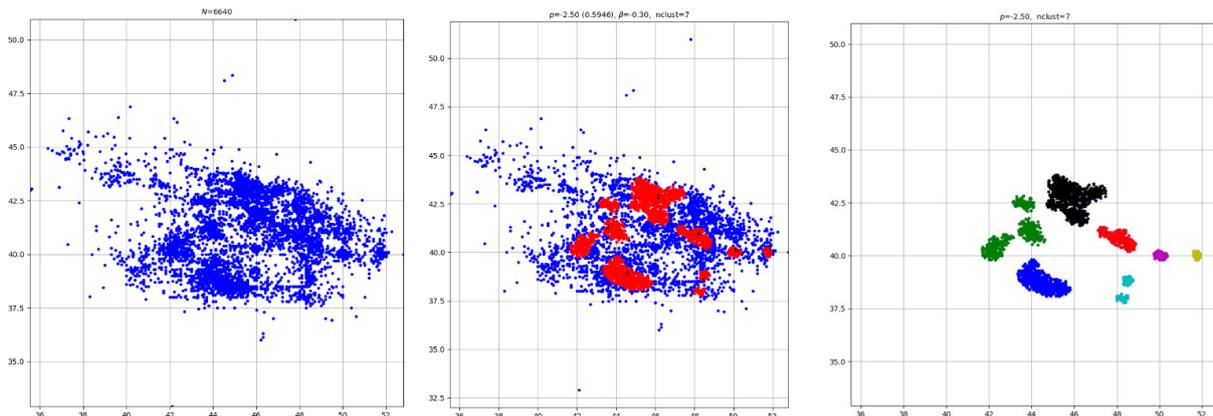
Ранее в ГЦ РАН разработан алгоритм кластеризации (топологической фильтрации) DPS [Агаян и др., 2014]. Результат его работы обозначается  $DPS(q(r), \beta)(X)$ . Пусть дано КМП  $(X, d)$ . На нем действует алгоритм  $DPS(q, \beta)$ . Это принимается как данность:

параметр  $r$  считается инфинитезимально малым для  $(X, d)$ , а  $\beta$ -уровень – абсолютным. Поэтому результат  $\Pi = DPS(q, \beta)(X)$  работы  $DPS(q, \beta)$  на  $X$  ( $\equiv$  сокращения  $X$ , фильтрации  $X$ ) дальнейшему сокращению не подлежит, принимается полностью и высоко ценится.  $\Pi$  представляет собой дизъюнктивное объединение  $r$ -связных компонент  $\Pi_i$ , каждая из которых  $\beta$ -совершенна и потому считается полностью монолитной, единой и неделимой, большой точкой. Пятна  $\Pi_i$  считаются фрагментарными проявлениями (выходами) единых глобальных аномальных сущностей. Кластеризация (соединение) пятен нужна для понимания их (аномалий) истинных масштабов.

Взгляд на пятна разномасштабен. Если он «ловит» компактное скопление пятен, то оно считается глобальным проявлением (портретом) аномалии соответствующего взгляду уровня. Геофизическая интерпретация таких аномалий и доверие к ним – дело исследователя. С формальной точки зрения получается разномасштабный взгляд на соединение пятен в духе вейвлетов, фракталов, ДМА-трендов, ДМА-аномалий на временных рядах.

На рисунке 9.5 мы видим три уровня:

1.  $(1+2) \vee 3 \vee (4+5) \vee 6$ .
2.  $(1+2) \vee 3 \vee ((4+5) \vee 6)$ .
3.  $((1+2) \vee 3) \vee ((4+5) \vee 6)$ .



**Рисунок 9.5 – Агломеративная иерархическая кластеризация каталога землетрясений Кавказа**

Соединения первого уровня: от множества расстояний  $D_0(X) = D(X)$  мы переходим к его подмножеству  $D_1(X) : D_1(X) = \{d \in D(X) : d > r^0\}$ , где  $r^0 = r$ .

Это означает, что взгляд первого уровня на пространство  $X$  уже не видит расстояния между элементами  $X$ , не превосходящие  $r^0$ . Частично-метрическое пространство  $X_1 = (X, D_1(X))$  дает первый порог малости  $r^1$ , следующий за нулевым  $r^0$ :

$$r^1 = r_q(X_1) = \left( \frac{\sum_{d \in D_1(X)} d^q}{|D_1(X)|} \right)^{1/q}.$$

Если  $\Pi^0 = \Pi = \bigvee_{i_0=1}^{N_0} \Pi_{i_0}^0$  пятна нулевого уровня в  $X$ , получающиеся в результате работы  $DPS(q, \beta)$  на  $X$ , то пятнами (портретами аномалий) 1-ого уровня  $\Pi_{i_1}^1$  будут компоненты  $r^1$ -связности на  $\Pi$ . Они образуют разбиение  $\Pi^1$  на  $\Pi$ :

$$\Pi = \bigvee_{i_1=1}^{N_1} \Pi_{i_1}^1; \quad \left\{ \Pi_{i_1}^1 \Big|_{i_1}^{N_1} \right\} = \Pi^1.$$

Соединения второго уровня: от множества расстояний  $D_1(X) = D(X)$  мы переходим к его подмножеству  $D_2(X) : D_2(X) = \{d \in D(X) : d > r^1\}$ .

Это означает, что взгляд второго уровня на пространство  $X$  уже не видит расстояния между элементами  $X$ , не превосходящие  $r^1$ . Частично-метрическое пространство  $X_2 = (X, D_2(X))$  дает второй порог малости  $r^2$ , следующий за нулевым  $r^1$ :

$$r^2 = r_q(X_2) = \left( \frac{\sum_{d \in D_2(X)} d^q}{|D_2(X)|} \right)^{1/q}.$$

Компоненты  $r^2$ -связности  $\Pi_{i_2}^2$  на  $\Pi$  образуют пятна

(портреты аномалий) 2-ого уровня. Их совокупность  $\Pi^2$  будет следующим разбиением  $\Pi$ , включающим  $\Pi^1$ , возможно нестрого:  $\Pi = \bigvee_{i_2=1}^{N_2} \Pi_{i_2}^2; \quad \left\{ \Pi_{i_2}^2 \Big|_{i_2}^{N_2} \right\} = \Pi^2$ . Возникает иерархическая нестрогая возрастающая кластеризация  $\{\Pi^i\}$  на  $\Pi$ , которая закончится соединением всех пятен на  $\Pi$ .

Остановка в иерархической кластеризации  $\{\Pi\}$  имеет два аспекта: математический и геофизический. Второй решающий, но мы можем говорить только о первом (математическом):

- во-первых: на остановку претендуют элементы нестрогой кластеризации, когда

$\prod^i = \prod^{i+1}$  и, чем длиннее период постоянства, тем обоснованнее остановка;

- **во-вторых**: полное соединение всех пятен – финальный этап иерархической кластеризации при условии ее достаточной динамичности. В этом случае финальный радиус не успеет стать слишком большим по модулю  $D(X)$ .

## **Заключение**

Для территории Российской Федерации, а также значительной сопредельной территории построены карты высокого разрешения гравитационного поля (аномалии в свободном воздухе, аномалии Буге, вертикальные градиенты гравитационного поля) и изостатических аномалий гравитационного поля. Карты оформлены в виде слоев ГИС и объединены в картографические сервисы, опубликованные на ГИС-сервере ГЦ РАН.

Важнейшим результатом исследований в 2018 г. является создание принципиально нового алгоритма агломеративной иерархической кластеризации, основанного на колмогоровских средних с отрицательным показателем. Разработанный алгоритм применяется к результатам работы алгоритма DPS в геофизических массивах данных и позволяет более точно описать находящиеся в нем аномалии. Алгоритм DPS фильтрует массив, очищая его от фоновых точек и оставляя его реперные, знаковые элементы. Некоторая часть из них нуждается в дальнейшем объединении. Созданный алгоритм выполняет такое объединение.

## **Список использованных источников**

Агаян С.М., Ш.Р. Богоутдинов, М.Н. Добровольский (2014), Дискретные совершенные множества и их применение в кластерном анализе, Кибернетика и системный анализ, № 2, сс. 17–32.

Кабан М.К. (2003), Плотностные неоднородности верхней мантии, изостазия литосферы и геодинамика, Диссертация ... доктора физико-математических наук, Москва, 273 с.

Amante C. and B.W. Eakins (2008), ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. National Geophysical Data Center, NESDIS, NOAA, U.S. Department of Commerce, Boulder, CO.

Beriozko A., A. Lebedev, A. Soloviev, R. Krasnoperov, A. Rybkina (2011), Geoinformation system with algorithmic shell as a new tool for Earth sciences, Russian Journal of Earth Sciences, Vol. 12, ES1001, doi: 10.2205/2011ES000501.

Förste C., F. Flechtner, R. Schmidt, R. Stubenvoll, M. Rothacher, J. Kusche, ... and

S. Bruinsma (2008), EIGEN-GL05C-A new global combined high-resolution GRACE-based gravity field model of the GFZ-GRGS cooperation. In Geophysical research abstracts (Vol. 10, pp. EGU2008-A).

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

Förste C., S.L. Bruinsma, O. Abrikosov, F. Flechtner, J.C. Marty, J.-M. Lemoine, ... and R. Biancale (2014B), EIGEN-6C4-The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 1949 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 16).

Kaban M.K., P. Schwintzer, Ch. Reigber (2004), A new isostatic model of the lithosphere and gravity field, *Journal of Geodesy*, Vol. 78, pp. 368–385.

Krasnoperov R.I. and A.A. Soloviev (2015), Analytical geoinformation system for integrated geological-geophysical research in the territory of Russia, *Gornyi Zhurnal (Mining Journal)*, Vol. 10, pp. 89–93, doi: 10.17580/gzh.2015.10.16.

Soloviev A.A., J.I. Zharkikh, R.I. Krasnoperov., B.P. Nikolov, S.M. Agayan (2016), GIS-oriented solutions for advanced clustering analysis of geoscience data using ArcGIS platform, // *Russian Journal of Earth Sciences*, Vol. 16, ES6004, doi: 10.2205/2016ES000587.

Stolk W., M. Kaban, F. Beekman., M. Tesauro, W.D. Mooney and S. Cloetingh (2013), High resolution regional crustal models from irregularly distributed data: Application to Asia and adjacent areas, *Tectonophysics*, Vol. 602, pp. 55–68.

Tesauro M., M.K. Kaban and S.A. Cloetingh (2008), EuCRUST-07: A new reference model for the European crust, *Geophysical Research Letters*, 35(5).

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

Номер проекта в ИС Минобрнауки: 0145-2018-0007

Номер госрегистрации: АААА-А18-118021990132-5

Руководитель: академик РАН А.Д. Гвишиани

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

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

### **10.1. Разработка теоретических методов структурирования и сравнительного анализа геофизических данных на основе теории графов**

**Эволюционные уравнения и случайные графы.** Многие геофизические процессы управляются случайными факторами и поэтому являются привлекательными объектами для использования аппарата эволюционных уравнений. Речь идет о необратимых процессах, в которых состояния системы меняются случайными скачками. Самый простой пример такой системы — обыкновенная диффузия частицы, которая под влиянием внешних факторов совершает случайные скачки в пространстве. В более общем случае состояния задаются векторами в фазовом пространстве, а динамика такой системы описывается уравнением вида

$$\partial_t W(Q, t) = \sum_{Q^+} A(Q^+, Q) W(Q^+, t) - W(Q, t) \sum_{Q^-} A(Q, Q^-), \quad (1)$$

где  $A(Q_1, Q_2)$  скорости переходов системы из точки  $Q_1$  фазового пространства в точку  $Q_2$ . В простейшем случае диффузии  $Q$  — это точки обычного пространства. Величины скоростей полностью определяются физическими процессами, которые мы хотим рассмотреть. Уравнение (1) будем называть эволюционным уравнением. Эта общая схема может быть применена для решения многих задач дискретного математического анализа.

В данной работе она применена для решения задачи об эволюции случайного графа, при решении применяется аппарат эволюционного уравнения, который оказался более эффективным по сравнению с аппаратом комбинаторного анализа. Граф представляет

собой множество точек случайным образом соединяемых ребрами. Ребра добавляются по одному (в среднем) в единицу времени. Для случая графа уравнение (1) описывает временное изменения в структуре графа связанные с процессом случайного добавления в него новых ребер. Этот процесс тесно связан с коалесценцией дисперсных частиц и также ведет к появлению сингулярностей в поведении спектров и их моментов в течение конечных промежутков времени. Такие сингулярности возникают вследствие появления гигантских агломератов. В случае графа — это гигантский связный суперграф порядок которого сравним с полным числом вершин во всем графе.

Рассмотрим набор точек соединенных между собой случайным образом линиями. Такой объект называется случайным конечным графом. Точки называются вершинами, а линии их соединяющие — ребрами. Пусть  $M$  — полное число вершин в графе, а сам граф состоит из неприводимых компонент, которые не распадаются на независимые части при устранении одного ребра. Каждая реализация графа может быть охарактеризована  $\{n_{g,v}\}$  — числом неприводимых компонент имеющих в своем составе  $g$  вершин (порядок компоненты) и  $v$  ребер. Ребро может соединить две неприводимые компоненты, и тогда возникнет одна компонента, порядок которой равен сумме порядков материнских компонент.

$$(l, \lambda) + (m, \mu) \rightarrow (l + m, \lambda + \mu + 1), \quad (2)$$

или ребро может соединить две вершины принадлежащие одной компоненте. Тогда на единицу изменится число ребер в этой компоненте.

$$(g, v) \rightarrow (g, v + 1). \quad (3)$$

Любая реализация случайного графа задается набором чисел заполнения  $\{n_{g,v}\}$ , числом связных компонент порядка  $g$  с  $v$  ребрами. Задача об эволюции графа ставится следующим образом. Нужно найти зависящую от времени вероятность обнаружить граф в заданном состоянии.

**Основные уравнения.** Пусть есть граф порядка  $M$  содержащий  $N$  связных компонент. Каждая компонента характеризуется ее порядком  $g$ , и степенью заполнения  $v$ . Любое состояние графа задается набором чисел заполнения

$$Q = (n_{1,0}, n_{2,1}, n_{3,2}, n_{3,3}, \dots, n_{g,v}, \dots) = \{n_{g,v}\}, \quad (4)$$

где  $n_{g,v}$  — число связных компонент порядка  $g$  с  $v$  ребрами.

Данному состоянию  $Q$  предшествует два типа состояний,

$$Q^- = \{n_{1,0}, n_{2,1}, n_{3,2}, n_{3,3}, \dots, n_{l,\lambda} + 1, \dots, n_{m,\mu} + 1, \dots, n_{g,\lambda+\mu} - 1, \dots\} \quad (5)$$

$$\tilde{Q}^- = \{n_{1,0}, n_{2,1}, n_{3,2}, n_{3,3}, \dots, n_{g,\nu-1} + 1, n_{g,\nu} - 1, \dots\}. \quad (6)$$

Для помеченных графов эффективность процесса коалесценции пропорциональна  $lm$  — числу способов соединить две связные компоненты ребром. Эффективность заполнения связной компоненты пропорциональна  $g(g-1)/2-\nu$ , — числу свободных мест, на которые можно поместить ребро.

На этом этапе мы введем вероятность  $W(Q, t)$  обнаружить граф в состоянии  $Q$  в момент времени  $t$ . Для этой вероятности можно написать эволюционное уравнение,

$$\begin{aligned} \frac{dW(Q, t)}{dt} = & \sum_{Q^-} A(Q, Q^-) W(Q^-, t) - \sum_{Q^+} A(Q^+, Q) W(Q, t) \\ & + \sum_{\tilde{Q}^-} B(Q, \tilde{Q}^-) W(\tilde{Q}^-, t) - \sum_{\tilde{Q}^+} B(\tilde{Q}^+, Q) W(Q, t). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $(Q^+)^- = (Q^-)^+ = Q$  и  $(\tilde{Q}^+)^- = (\tilde{Q}^-)^+ = Q$ , т.е., состояние  $Q$  предшествует состояниям  $Q^+$  и  $\tilde{Q}^+$ ,  $A$  и  $B$  - скорости переходов, которые выражаются через числа заполнения. Далее вводится производящий функционал для вероятности  $\Psi$ . Уравнение для  $\Psi$ :

$$T \frac{\partial \Psi}{\partial t} = (L_f + L_c) \Psi. \quad (8)$$

Оно дополняется начальными условиями.

**Решение эволюционного уравнения.** Полный порядок графа не меняется в течение эволюционного процесса, и тогда решение эволюционного уравнения в виде собственного функционала оператора полного порядка графа  $\hat{M} \Psi_M = M \Psi_M$ .

$$\Psi_M = \frac{M!}{2\pi i} \oint z^{-(M)} \exp(\sum_{g,\nu} a_{g,\nu}(t) x_{g,\nu} z^g) dz. \quad (9)$$

Интеграл берется по контуру окружающему точку  $z=0$ . Затем вводится производящая функция, уравнение сводится к линейному и решается разделением переменных.

Главный результат этого рассмотрения — точное выражение для среднего спектра связных компонент,

$$\bar{n}_{g,\nu}(t) = \frac{M!}{(M-g)! g!} e^{(g^2-2Mg+g)/2T} (e^{t/T} - 1)^\nu C_{g,\nu}. \quad (10)$$

Здесь  $C_{g,v}$  — число связных компонент порядка  $g$  соединенных  $v$  ребрами, а  $T$  — характерное время процесса коалесценции. Это время характеризует временную шкалу процесса и зависит от конкретной реализации генерации графа. Далее рассчитывается число связных компонент с циклами (одноцикловые и двуцикловые компоненты) и их спектры.

Таким образом разработан метод исследования временной эволюции случайных графов в общей формулировке. Наибольший интерес представляет подход к эволюции нелинейных систем, описание которых в рамках непрерывной математики затруднительно. Вместо этого предлагается сводить систему к множеству точек и задавать эволюционный закон, позволяющий выделять наиболее существенные черты эволюционного процесса. Например, если мы имеем дело с дисперсной системой — множеством изолированных объектов, которые с течением времени сливаются (или, наоборот, распадаются в результате взаимодействия элементов системы между собой, то удобно представлять такую систему случайным графом, а каждый акт взаимодействия моделировать появлением или исчезновением ребра между вершинами графа. Так можно смоделировать эволюцию сетей, появление и развитие трещин на поверхности, возникновение критических явлений во время землетрясений и даже возникновение и развитие интеллекта. Совершенно очевидно, что несмотря на крайнюю простоту исходной схемы (система вершин плюс система ребер) эволюционные свойства модели приводят к абсолютно нетривиальным результатам, таким как образование гигантской компоненты и ее посткритическое развитие.

#### **а. Численное моделирование параметров полярной ионосферы**

**Семейство моделей.** Последние десятилетия характеризуются интенсивным развитием космических и наземных систем наблюдения за электродинамическими параметрами ионосферы и магнитосферы. Статистический анализ большого количества полученных данных позволяет строить эмпирические модели, описывающие усредненные состояния окружающей среды. С другой стороны, эффективным способом количественного описания глобального распределения параметров является математическое моделирование, основанное на решении уравнений, описывающих физические процессы, происходящие в ионосферно-магнитосферной системе. В отличие от эмпирических математические модели позволяют не только воспроизводить фоновые, достаточно спокойные условия, но и дают возможность проводить численные эксперименты, в которых входные параметры задаются в широких пределах, что важно для прогнозирования экстремальных ситуаций.

В 2018 и предшествующие годы выполнялись работы по развитию семейства численных

физико-математических моделей для исследования электродинамики высокоширотной ионосферы. Основными компонентами этого семейства являются модель распределения магнитного поля на верхней границе ионосферы, которое создается электрическими токами магнитосферного происхождения; модель распределения электрического потенциала в ионосфере Земли в глобальной постановке, т.е. при учете электродинамической связи между ионосферными оболочками северного и южного полушарий; модель распределения концентрации электронов в диапазоне высот 120—500 км.

Модель глобального распределения ионосферного электрического потенциала, построенная на основе решения краевой задачи о растекании ионосферных токов, позволяет рассчитать траектории конвекции ионосферной плазмы в северном и южном полушариях и выявляет возможность эффективного проникновения электрических полей, генерируемых в полярной шапке продольными токами магнитосферного происхождения, в средние широты и в противоположную полярную шапку за счет электродинамической связи полушарий.

Расчет магнитного потенциала, создаваемого продольными токами над ионосферой, позволяет моделировать общую картину распределения горизонтальных компонент магнитной индукции и может служить для верификации измерений спутниковых магнитометров, которые регистрируют компоненты поля в точках вдоль своей орбиты.

Численная модель высокоширотной ионосферы позволяет оперативно рассчитывать трехмерную структуру F-области при различных гелио-геофизических условиях. Траектории конвекции моделируются в блоке расчёта электрических полей с непрерывной зависимостью их геометрии и интенсивности от входных параметров в виде значений межпланетного магнитного поля, скорости солнечного ветра, дня года, мирового времени и уровня геомагнитной и солнечной активности. В ионосферном блоке рассчитывается высотное распределение  $N_e$ . Учитываются обобщенный молекулярный ион  $M^+$  и ион  $O^+$ , концентрация которых определяется соответственно решением уравнения баланса и конвективно-диффузионного уравнения вдоль траектории конвекции с учётом поля конвекции и коротации и параметров термосферы. Все модели реализованы в виде программных средств, удобных для практических приложений.

**Ассимиляции данных для численной модели ионосферы.** Ассимиляция данных направлена на обновление уже существующих знаний об определенных параметрах с помощью прямых или косвенных измерений. Применительно к ионосфере мы должны найти решение как разность между измерениями ионозонда и фоновой моделью. В результате получается обновленный вектор фоновой модели на двумерной сетке для пиковых характеристик  $N_e$  в слое F2, то есть  $hmF2$  и  $NmF2$ . Чтобы избежать резких

локальных градиентов, вычисление наименьших квадратов фона к измерениям выполняется до применения дополнительных процедур ассимиляции для вычисления первой оценки.

$$\min \sum_{k=1}^N (u_{mod,k} + \delta - u_{measur,k})^2. \quad (11)$$

Были протестированы следующие методы.

*Метод оптимальной интерполяции.* Он обеспечивает наилучшую линейную несмещенную оценку и позволяет явное применение фона и ковариационной матрицы ошибки измерения и вывод матрицы анализа, показывающей оценку ошибки, то есть

$$u_a = u_b + W(v - Gu_b), \quad (12)$$

$$W = B \cdot G^T (R + G \cdot B \cdot G^T)^{-1}, \quad (13)$$

где  $u_b$  определяется в регулярной сетке и заполняется значениями  $hmF2$  или  $NmF2$  с фоновой модели,  $W$  — оптимальная взвешивающая матрица,  $G$  задает сеточные значения для измерений с помощью билинейной интерполяции,  $B$  обозначает ковариационную матрицу фоновой ошибки, а  $R$  — ковариационную матрицу ошибок измерения.

*Метод последовательной коррекции.* Это итеративный эмпирический метод, в котором оценка ошибки ( $u_a$ ) не представляется в виде вектора. Для первого шага итерации  $u_a$  задается выровненным фоном в точке сетки. На каждой итерации  $n$  вычисляется

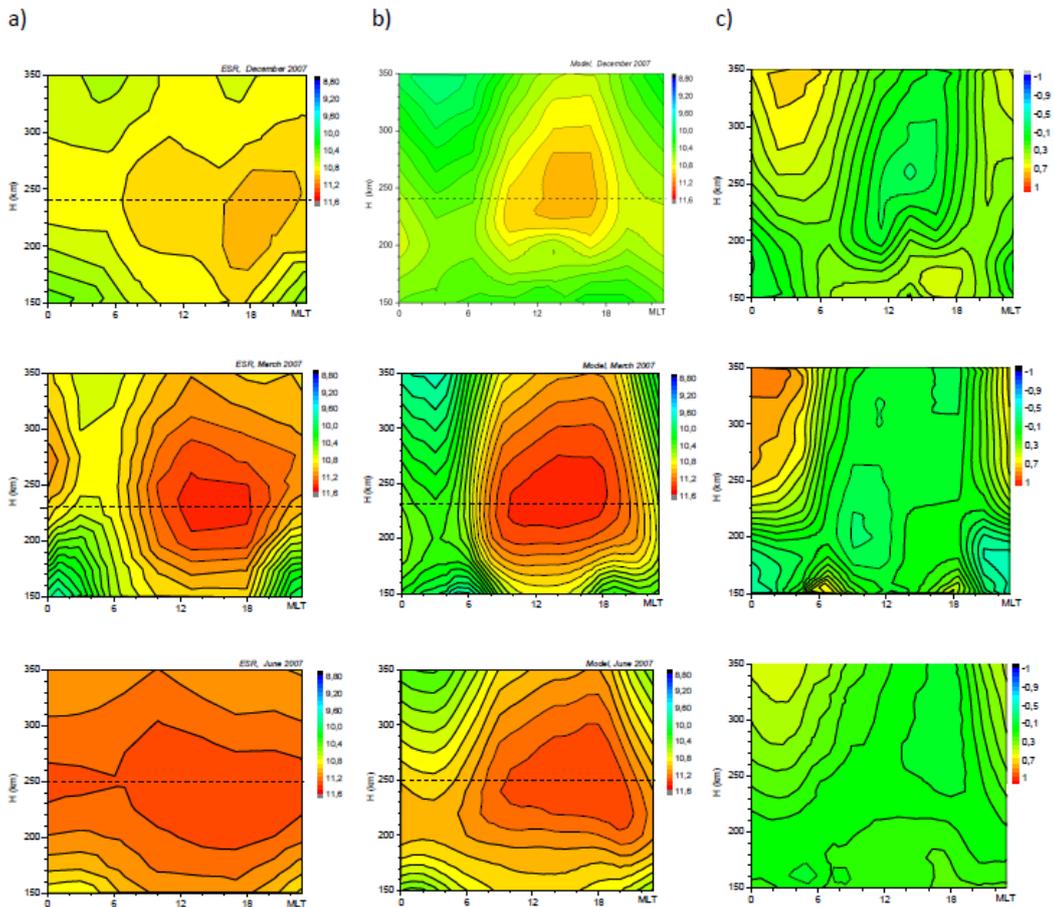
$$u_{a,i}^n = u_{a,i}^{n-1} + \frac{\sum_{k=1}^N W_{ik}^n (V_k - u_{a,k}^{n-1})}{\sum_{j=1}^N W_{ij}^n + \varepsilon^2}. \quad (14)$$

$N$  — длина вектора наблюдения, то есть количество измерений,  $V_k$  —  $k$ -е наблюдение,  $u_{a,k}$  —  $(n-1)$ -ая оценка в точке наблюдения  $k$ , полученная билинейной интерполяцией из соседних точек сетки;  $\varepsilon$  — оценка соотношения между дисперсией ошибок измерений и дисперсией фоновой ошибки и  $W_{ik}$  — вес для очередного обновления. *Модифицированный метод последовательной коррекции.* Предыдущий метод может быть улучшен путем выбора соответствующей оценки отношения между дисперсией ошибок измерений и дисперсией фоновой ошибки вместо постоянного коэффициента.

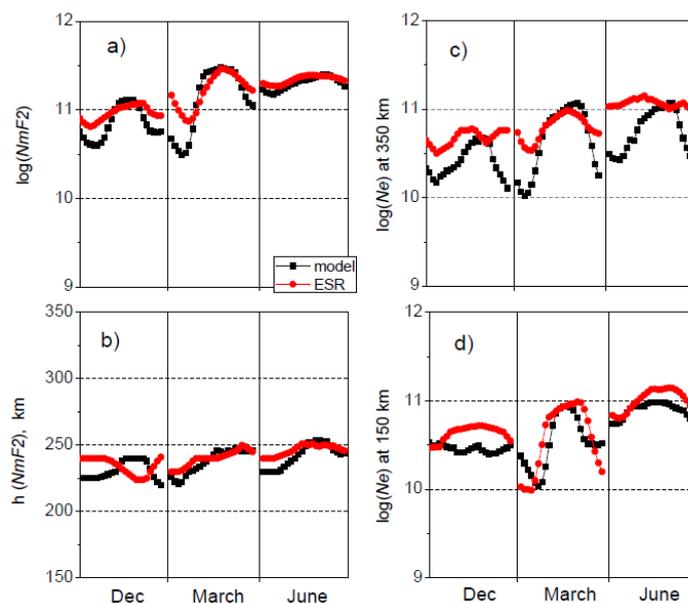
Методы тестировались по наиболее репрезентативному параметру  $NmF2$  и период максимально низкой солнечной активности 2007-2008 гг. Чтобы проверить различные подходы к ассимиляции, ряд независимых ионозондов были выбраны в качестве эталона. Разности между восстановленными и контрольными значениями  $NmF2$  рассчитывались в точках регулярной сетки и интерполировались в требуемую географическую точку. В качестве контрольных точек выбран ионозонд Соданкюля (67,4N, 26,6E) и радар некогерентного рассеяния EISCAT (69,6N, 19,2E).

Результаты сравнения модельных и измеренных с помощью радара EISCAT ESR значений электронной плотности  $N_e$ , максимума  $N_e$  ( $NmF2$ ) и высоты максимума

представлены на рисунках 10.1 и 10.2. Можно видеть достаточно хорошее совпадение экспериментальных и модельных значений везде, кроме околополуденной области, в которой модель предсказывает меньшие значения для высот  $h > 250$  км и большие значения для высот, меньших 200 км. На высотах  $\sim 150$  км, а также летом, результаты, согласуются достаточно хорошо.



**Рисунок 10.1– Распределение  $\log(N_e)$  по данным EISCAT в координатах местное магнитное время – высота в диапазоне 150-350 км для декабря, марта и июня 2007 г. Измеренные и модельные значения  $\log(N_e)$  показаны в левой и средней колонках графиков, разность между ними – в правой колонке. Интервал между изолиниями составляет 0,1**



**Рисунок 10.2 – Модельные (красная линия) и наблюдаемые (черная линия) значения  $\log(NmF2)$  (a) и высота слоя F2 ( $NmF2$ ) на высотах 350 и 150 км в четырех секторах местного магнитного времени (00, 06, 12 и 18 часов) для декабря, марта и июня 2007 г.**

### **Заключение**

Полученные результаты направлены на развитие концепции региональной модели распределения электронной концентрации в F-области полярной ионосферы на основе численной модели, дополненной блоком ассимиляции данных измерений. Разработаны алгоритмы и программные средства, проведена их отладка и тестирование, получена оценка эффективности различных методов для целей повышения точности моделирования, а также с точки зрения затрат вычислительных ресурсов. Разработаны алгоритмы для реализации методов ассимиляции и проведены тестовые расчеты ассимиляции данных измерений в базовую (фоновую) численную модель. Разработаны методы дискретной математики в применении к теории графов. Продемонстрированы возможности метода исследования временной эволюции случайных графов в эволюции нелинейных систем, описание которых в рамках непрерывной математики затруднительно. Показано, что следует сводить систему к множеству точек и задавать эволюционный закон, позволяющий выделять наиболее существенные черты эволюционного процесса. Разработанные методы использованы для расчета процессов коагуляции и гелеобразования. По результатам 2018 г. получены 4 Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и опубликовано 3 статьи.

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

**Номер проекта в ИС Минобрнауки: 0145-2018-0008**

**Номер госрегистрации: АААА-А18-118021990129-5**

**Руководитель: академик РАН А.Д. Гвишиани**

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

### **11.1. Задачи исследования**

Объектом исследования являются вариации магнитного поля в высоких широтах Земли. Целью работы является мониторинг вариаций геомагнитного поля и оценка их влияния на точность подземной навигации. Задача проекта – разработка методики использования данных геомагнитных измерений для моделирования и коррекции фактических параметров и ориентации буровой колонны в условиях спорадических возмущений геомагнитного поля во время магнитных бурь в Арктике. В высоких широтах спорадические геомагнитные возмущения, связанные с магнитными бурями, вносят большую неопределенность в показания скважинных инклинометров при наклонно направленном бурении глубоких скважин. Вариации магнитного склонения могут приводить к значительным отклонениям фактических координат ствола скважины от заданной траектории. С помощью методов, применяемых для расчета фактического профиля ствола скважины, проведены модельные оценки влияния спорадических возмущений магнитного склонения, наблюдаемых во время магнитных бурь, на азимут смещения и интенсивность искривления ствола в заданных локациях в месте расположения двух высокоширотных магнитных обсерваторий. Показано, что если геомагнитные возмущения не отфильтровываются на основе данных параллельных обсерваторских наблюдений, они могут приводить к неприемлемо большим погрешностям скважинных инклинометрических измерений и отклонению траектории ствола на величину, превышающую допустимые значения. Продолжено развитие системы магнитных наблюдений в арктической зоне. Новая обсерватория организуется на о. Самойловский. Усовершенствованы методы обработки данных и достигнуто систематическое повышение качества базисной линии магнитометра в полуавтоматическом режиме с использованием всех доступных на обсерватории данных.

Фундаментальная задача проекта связана с разработкой новой технологии для подземной навигации при наклонно-направленном бурении глубоких скважин в

Арктике. Такие скважины могут достигать резервуаров, расположенных за несколько километров от исходной точки бурения, в том числе под морским дном. Внедрение технологии геомагнитного сопровождения будет происходить по мере освоения северных месторождений.

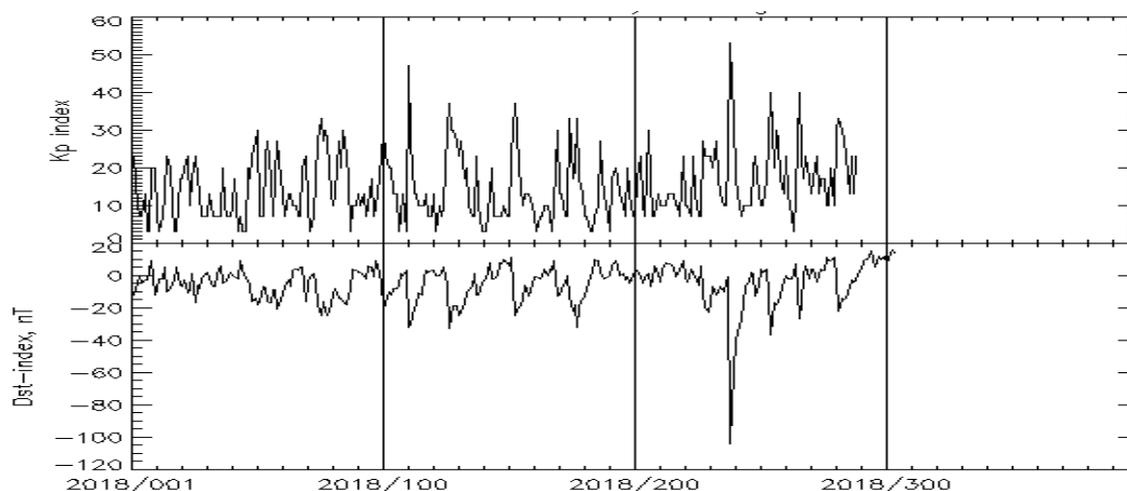
В подземной навигации при бурении глубоких наклонно-направленных скважин для измерения зенитного угла и азимута применяют телеметрические измерительные системы, основанные на магнитометрической технологии. Контроль ориентации буровой колонны под землей основывается на данных непрерывных измерений магнитного поля компонентным магнитометром-инклинометром, расположенным в немагнитной капсуле на конце буровой колонны. Так как главное магнитное поле Земли представляет собой диполь, в высоких широтах горизонтальная составляющая вектора напряженности постоянного поля сравнительно невелика (несколько тысяч нТл). В то же время, при магнитных бурях текущие в ионосфере электрические токи вызывают спорадические отклонения горизонтальной компоненты до 5 000 нТл. В результате возникает недопустимо большая погрешность определения направления на истинный север по магнитному азимуту в пространстве под землей. В этой связи актуальной задачей повышения точности наклонного бурения скважин в арктическом регионе является разработка методов оперативной коррекции показаний скважинных инклинометров при спорадических возмущениях геомагнитного поля.

#### **а. Результаты мониторинга вариаций геомагнитного поля в 2018 г.**

Мониторинг возмущений геомагнитного поля проводился с помощью регулярного анализа параметров солнечного ветра по данным спутников (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>), геомагнитных индексов: Kp (<https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index>), Dst (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir>) и AE (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/index.html>), а также данных отдельных магнитных обсерваторий и станций. Индексы Kp, Dst и AE характеризуют, соответственно, общепланетарный уровень возмущенности геомагнитного поля, развитие магнитосферного кольцевого тока во время магнитной бури и интенсивность авроральных ионосферных электроджетов. В режиме реального времени анализировались данные российских обсерваторий, поступающих в ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» (<http://ckp.gcras.ru/>). Для этого использовался аппаратно-программный комплекс «МАГНУС», разработанный в ГЦ РАН.

На рисунке 11.1 представлены геомагнитные индексы Kp и Dst. Можно видеть, что Kp имел два максимума: в апреле и августе. При этом, как показывает Dst индекс, кольцевой

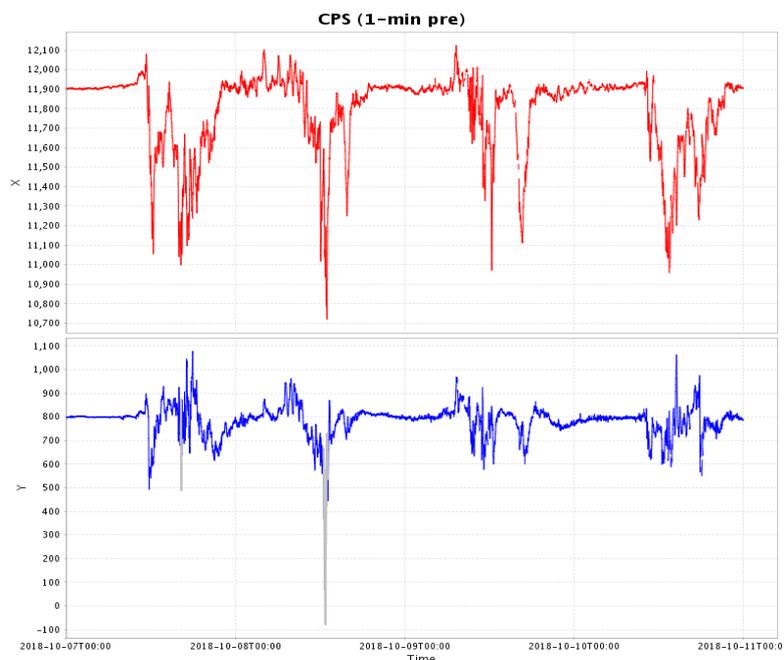
ток развился только во втором случае, магнитная буря произошла 26–27 августа ( $Dst < -100$  нТл), тогда как в апреле  $Dst$  не опускался ниже  $-40$  нТл.



**Рисунок 11.1 – Среднесуточные значения Kp и Dst индексов**

На территории РФ магнитограммы высокоширотных обсерваторий (рис. 11.2) показывают, что максимальная амплитуда отклонения горизонтальной Н компоненты геомагнитного поля составляет порядка 1000 нТл.

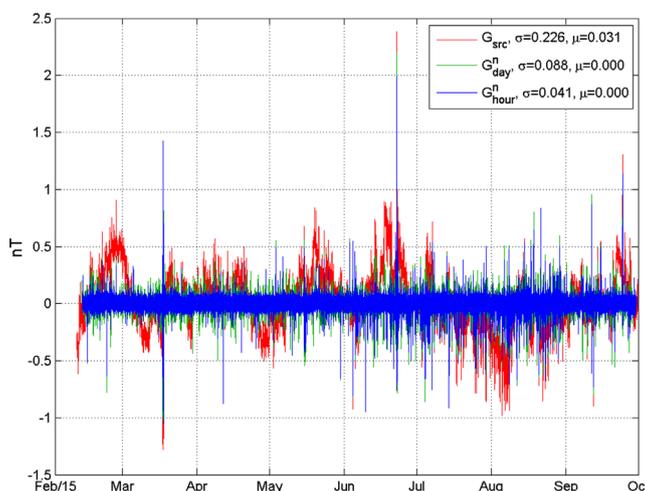
**Расширение сети магнитных обсерваторий и усовершенствование методов обработки данных.** Были проведены подготовительные магнитные исследования на территории НИС для определения мест, пригодных для возведения абсолютного и вариационного павильонов планируемой обсерватории стандарта международной сети ИНТЕРМАГНЕТ. При этом решались следующие основные задачи: (1) Рекогносцировка территории острова, выявление потенциальных участков съемки с учетом особенностей местности и расстояния от имеющихся сооружений и коммуникаций НИС. (2) Проведение на исследуемой территории площадной магнитоградиентометрической съемки для исследования характера распределения аномалий магнитного поля и его градиента. (3) Локализация участков, благоприятных для расположения павильонов обсерватории и мест закладки приборных постаментов. В ходе обсуждений с сотрудниками станции были запланированы дальнейшие шаги по непосредственной реализации проекта, а также намечены планы научного сотрудничества ГЦ РАН и ИНГГ СО РАН в области геомагнитных исследований.



**Рисунок 11.2 – Минутные значения горизонтальных компонент геомагнитного поля на obs. Мыс Челюскин (CPS) 26–27 августа 2018 г.**

Для обеспечения точности, требуемой в современных научных исследованиях, на каждой магнитной обсерватории необходимо проводить периодическую калибровку вариационного магнитометра. Такая калибровка обеспечивается в результате наблюдений абсолютных значений магнитного поля (абсолютные наблюдения), которые выполняются обученным специалистом с помощью абсолютного магнитометра. Получаемые измерения дают возможность рассчитать калибровочные поправки, т.н. базисные значения, для каждой компоненты векторного магнитометра. Был разработан новый подход к расчету регулярных рядов базисных значений, в котором устранены два существенных недостатка, присущих принятой в сети ИНТЕРМАГНЕТ методике. Была продемонстрирована его эффективность применительно к синтетическим магнитограммам. В 2018 г. метод был опробован на реальных данных, зарегистрированных на обсерватории ИНТЕРМАГНЕТ «Санкт-Петербург». В настоящей работе приводятся результаты сравнения окончательных данных за 2015 г., полученных с использованием классического и предложенного методов. Главным показателем эффективности предложенного метода является результирующая кривая  $\Delta F$ , которая широко используется в ИНТЕРМАГНЕТ в качестве индикатора качества данных. Основное отличие рядов  $\Delta F$ , построенных по старому и усовершенствованному методам, состоит в существенном уменьшении среднеквадратичного отклонения с  $\sigma = 0,226$  нТл до  $\sigma = 0,041$  нТл при использовании почасовых базисных и  $\sigma = 0,088$  нТл при использовании ежесуточных базисных и снижением математического ожидания до 0. На рисунке 11.3 представлены три

соответствующих графика  $\Delta F(G_{src}, G_{hour}^n, G_{day}^n)$  по всему расчётному интервалу. Сравнительный анализ показывает, что окончательные данные, полученные при помощи разработанного алгоритма, удовлетворяют требованиям ИНТЕРМАГНЕТ. Кроме того, благодаря новому методу существенно улучшаются качественные показатели данных в сравнении с классическим подходом.



**Рисунок 11.3 – Сравнение  $\Delta F$ , полученной по принятым ИНТЕРМАГНЕТ definitive-данным (синий), с кривыми  $\Delta F$ , полученными новым методом по часовым (зеленый) и суточным (красный) базисным значениям за период с 20 февраля по 1 октября 2015 г.**

### 11.3 Оценка влияния геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин в арктическом регионе

**Особенности профилей горизонтальных скважин.** Профиль горизонтальной скважины состоит из двух сопряженных между собой частей: направляющего и горизонтального участков ствола. При расчете профиля этой части горизонтальной скважины кроме проектной глубины и отклонения забоя от вертикали необходимо задавать значение зенитного угла на проектной глубине. Методика расчета направляющей части профиля горизонтальной скважины основана на решении системы уравнений проекций участков профиля на вертикальную и горизонтальную плоскости. Горизонтальные скважины с большим радиусом кривизны ( $> 190$  м) могут быть сооружены при кустовом бурении на суше и море, а также при бурении одиночных скважин со значительной протяженностью горизонтального участка (600–1 500 м). Для таких скважин используются стандартная техника и технология направленного бурения, позволяющая создать максимальную интенсивность искривления ( $0,7\text{--}2^\circ$  на 10 м проходки). Горизонтальные скважины со средним радиусом кривизны (60–190 м) применяют как при бурении одиночных скважин, так и для восстановления эксплуатационной характеристики действующих скважин. Максимальная интенсивность искривления таких скважин  $3\text{--}10^\circ$  на

10 м при длине горизонтального участка 450–900 м. Горизонтальные скважины со средним радиусом кривизны позволяют точнее попадать в глубинную цель, что особенно важно для вскрытия нефтяных и газовых пластов малой мощности. Горизонтальные скважины с малым радиусом искривления (10–60 м) обеспечивают наибольшую точность попадания в глубинную цель. Интенсивность искривления составляют 0–25° на 1 м проходки при длине горизонтального участка 90–250 м. С уменьшением радиуса кривизны ухудшаются условия работы бурильных труб, затрудняется прохождение в ствол забойных двигателей, геофизических приборов и обсадных труб. Проводка скважин с коротким и ультракоротким (< 10 м) радиусом кривизны невозможна без специальных труб и инструмента.

Контроль траектории ствола направленной скважины осуществляется путем непрерывного измерения азимута, зенитного угла и положения отклонителя. Основная задача технологии направленного бурения состоит в оперативном расчете величины и направления отклонения фактического профиля от проектного и корректирование траектории. Определение направления в пространстве под землей осуществляется с помощью непрерывных MWD измерений компонентным скважинным магнитометром, расположенным в немагнитной капсуле на конце буровой колонны. По измеренным значениям магнитных элементов можно однозначно определить направление на истинный северный полюс (истинный географический азимут) и величину отклонения от вертикали (зенитный угол). Технология скважинной инклинометрии предусматривает измерение в наборе точек ствола скважины зенитного угла  $\alpha$  и азимута  $\varphi$ , а также глубины скважины по вертикали и длины ствола от устья скважины до каждой точки измерения. В среднем измерения проводятся через каждые несколько десятков метров по длине ствола.

С целью оценки влияния геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин в высоких широтах было проведено моделирование отклонения траекторных параметров во время магнитной бури. Были рассчитаны траекторные параметры профиля виртуальной скважины при бурении в точках расположения обс. BBS и CPS в условиях геомагнитной бури 26–27 августа 2018 г.

Координаты для каждой точки измерений и смещение профиля от устья скважины по горизонтали можно рассчитать по следующему алгоритму. Приращения координат на отрезке  $\Delta L$  в соседних верхней и нижней точках замера  $i, i+1$  вдоль длины ствола  $L$  рассчитываются для метода минимума кривизны как

$$\begin{aligned} \Delta y &= T \cdot (\sin \alpha_i \cdot \sin \varphi_i + \sin \alpha_{i+1} \cdot \sin \varphi_{i+1}) \\ \Delta x &= T \cdot (\sin \alpha_i \cdot \cos \varphi_i + \sin \alpha_{i+1} \cdot \cos \varphi_{i+1}), \\ \Delta z &= T \cdot (\cos \alpha_i + \cos \alpha_{i+1}) \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$T = \frac{180 \cdot \Delta L \cdot \operatorname{tg} \frac{F}{2}}{\pi \cdot F}, \quad (4.2)$$

$$F = \arccos(\sin \alpha_i \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \alpha_{i+1} \cdot \sin \varphi_{i+1} + \sin \alpha_i \cdot \cos \varphi_i \cdot \sin \alpha_{i+1} \cdot \cos \varphi_{i+1}). \quad (4.3)$$

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

$$A_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2},$$

$$\Psi_i = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i}. \quad (4.5)$$

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

$$\gamma_i = \arcsin \sqrt{[\sin \alpha_{i+1} \cdot \cos \alpha_i \cdot \cos(\varphi_{i+1} - \varphi_i) - \sin \alpha_i \cdot \cos \alpha_{i+1}]^2 + \sin^2 \alpha_{i+1} \cdot \sin^2(\varphi_{i+1} - \varphi_i)}, \quad (4.6)$$

$$J_i = \frac{\gamma_{i+1,i}}{10}. \quad (4.7)$$

Расчитанные геометрические параметры определяют фактический профиль ствола скважины и дают возможность выявить места резкого искривления. Расчет производится по данным скважинных гравиметрических и инклинометрических измерений значений углов  $\alpha$  и  $\varphi$ . На рисунке 11.4 изображены координаты, вычисленные с использованием возмущённых величин азимута  $\varphi$  в том случае, если не проводится корректировка отклонений от проектного профиля и фактическое направление бурения не изменяется. В двух колонках графиков представлены (сверху вниз) зенитный угол, азимут и рассчитанные геометрические параметры ствола скважины для длины ствола 460 м (от 1 000 до 1 460 м). По горизонтальной оси отложена длина ствола  $L$ .

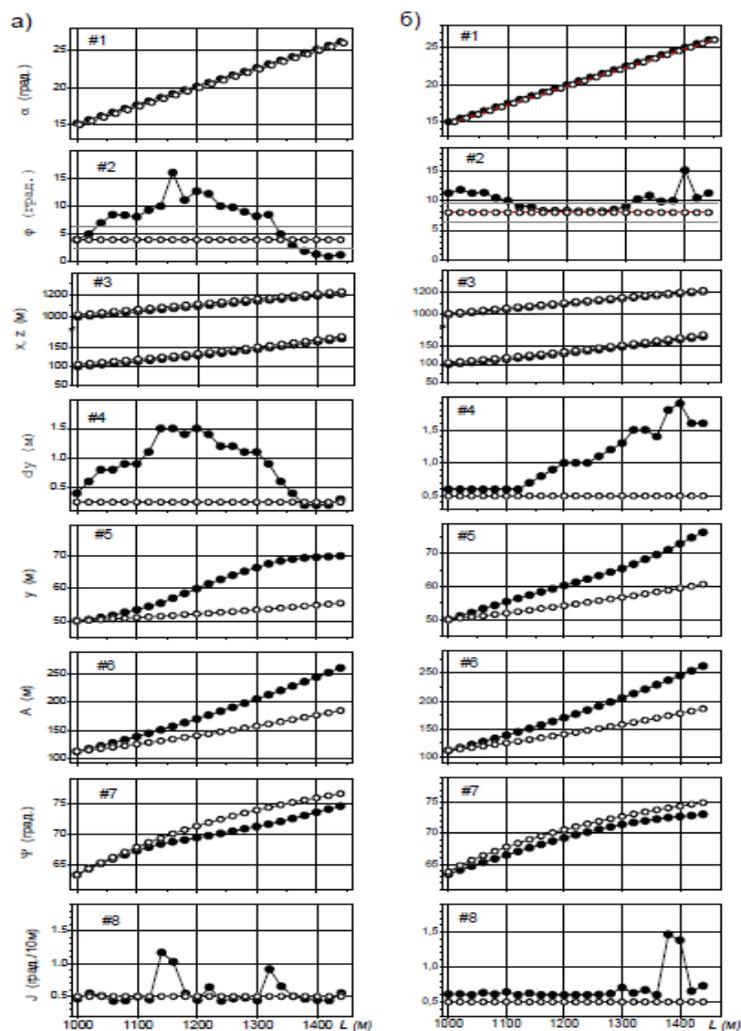


Рисунок 11.4 – Изменение зенитного угла и магнитного склонения и геометрические параметры фактического профиля ствола скважины для длины ствола 460 м (от 1 000 до 1 460 м). Сверху вниз(#1–#8): изменение зенитного угла  $\alpha$  и азимута  $\varphi$ ; изменение координат  $x$  и  $z$  фактического профиля; приращение координаты  $y$  на каждом шаге измерений; изменение координаты  $y$ ; смещение фактического профиля по горизонтали  $A$ ; азимут смещения  $\Psi$  и интенсивность искривления ствола на 10 м для (а) obs. BSS и (б) obs. CPS. Линиями с точками обозначены параметры в условиях магнитной бури, а линиями с кружками – соответствующие параметры в спокойных условиях

## **12. Грант РФФИ № 16-17-00121 «Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы»**

**Номер госрегистрации: АААА-А16-116030110009-6**

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

В работе по проекту велась работа по самым разным направлениям: расширялась экспериментальная база наблюдений за вариациями магнитного поля в РФ, анализировались данные глобальной сети магнитометров и данные единственной в РФ системы регистрации геоиндуцированных токов (ГИТ) в линиях электропередач, и разрабатывались теоретические основы новых методов анализа данных и построения глобальных моделей электродинамики ионосферы. В ходе работ по проекту получены важные результаты о физической природе некоторых магнитосферно-ионосферных явлений и их влиянии на наведенные токи в промышленных линиях электропередач по следующим направлениям, представленным ниже.

### **12.1. Развертывание новой магнитной обсерватории "Белое море" в Карелии**

Практически «с нуля» на Беломорской биологической станции МГУ им. М.В. Ломоносова (Карелия) был развёрнут новый пункт высококачественных геомагнитных измерений, оснащённый современной аппаратурой стандарта ИНТЕРМАГНЕТ "Белое море" (White Sea). Была проведена кропотливая работа по улучшению качества данных, поступающих с магнитометра. Вследствие высокоширотного расположения этой магнитной обсерватории (66,5° северной широты, то есть вблизи Полярного круга), она частично заполняет пробел в мировой сети магнитометров, существующий в Российском секторе (для сравнения, на территории США более 50 магнитных станций). Начиная с 20.10.2018 данные имеют высокое качество и могут быть использованы в научных исследованиях. Доступ к ним открыт через веб-сайт Геомагнитного центра данных ГЦ РАН (<http://geomag.gcras.ru>). В Международную Ассоциацию по Геомагнетизму и Аэронауке (IAGA) подана заявка на регистрацию станции с кодом WSE.

### **12.2. Авроральный овал и геомагнитные и ионосферные возмущения**

Ранее было установлено наличие связи между границами аврорального овала и наземными ультра-низкочастотными (УНЧ) магнитными вариациями. Также установлена пространственная связь между широтным максимумом дневных магнитных УНЧ

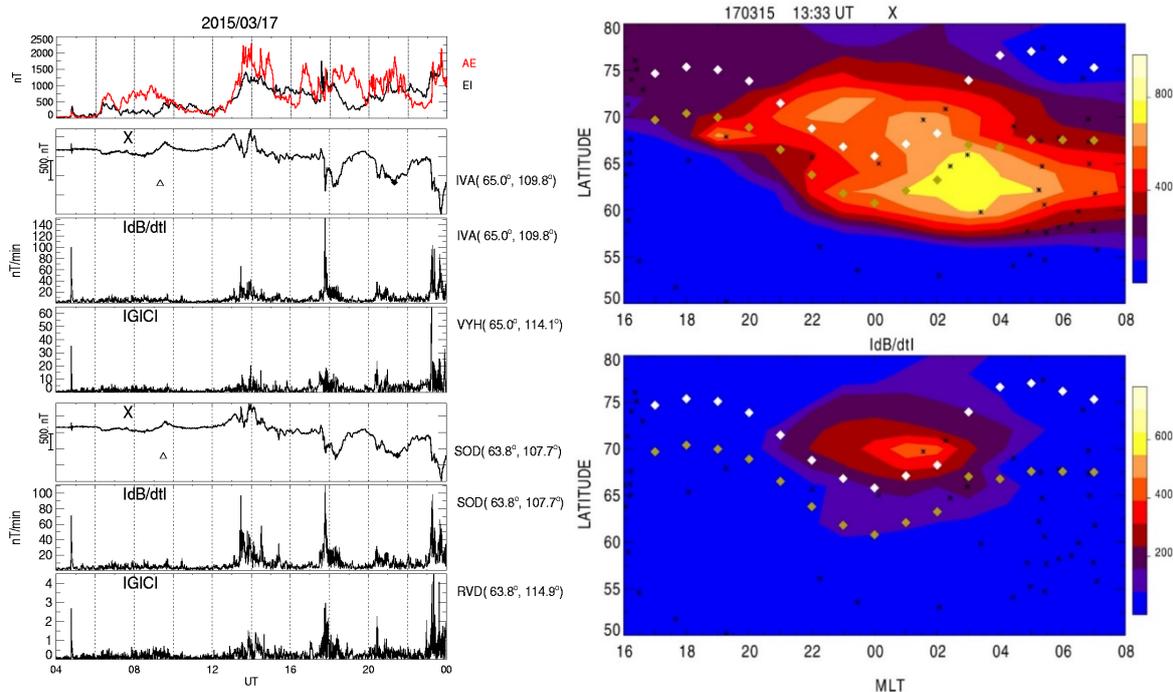
флуктуаций и ионосферной проекции границы магнитосферы вблизи полуженного меридиана [Pilipenko et al., 2018]. Надежные взаимодополняющие методы мониторинга положения аврорального овала (особенно наземные) важны для контроля устойчивости глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. Проведенный анализ мировой сети наземных геомагнитных наблюдений показал, что магнитные шумы и волны диапазона Pc5 (периоды от минуты до десятка минут) преимущественно локализованы внутри аврорального овала, полярная и экваториальная границы которого определялись по данным наблюдений авроральных электронов на спутнике DMSP (модель OVATION-Prime) [Martines-Bedenko et al., 2018]. Показано, что максимум спектральной мощности узкополосных Pc5 волн, как в утреннем, так и вечернем секторах, находится внутри аврорального овала вблизи его экваториальной границы. На основании предложенной модели предложен дополнительный способ мониторинга аврорального овала по максимуму в широтном распределении мощности Pc5 колебаний. Наличие нескольких взаимодополняющих методов мониторинга положения овала позволит более надежно указывать условия, при которых радиотрассы систем спутниковой навигации и радиосвязи проходят через авроральный овал. На основании полученных результатов предложен дополнительный простой способ мониторинга полюсной границы аврорального овала по наземным геомагнитным данным по максимуму в широтном распределении мощности Pc5 колебаний. Наличие нескольких взаимодополняющих моделей аврорального овала позволит более надежно указывать условия, при которых для заданного региона возможны сбои в системах спутниковой навигации и другие потенциально опасные явления.

### **12.3. Новые средства высокого уровня для анализа возмущений геомагнитного поля**

Разработаны новые средства высокого уровня (типа L3) для анализа пространственной-временной структуры возмущений геомагнитного поля – глобальные карты возмущений и магнитные кеограммы [Kozyreva et al., 2018a]. Эти средства были применены для изучения тонкой структуры магнитной бури 17 марта 2015 г. (буря "Святого Патрика"), вызванной приходом к Земле коронального выброса солнечной массы (СМЕ) и высокоскоростного потока солнечной плазмы (CIR), и для построения синергетической картины развития бури и ее влияния на наземные технологические системы. Эта буря имела необычно длительную главную фазу (~17 часов), во время которой происходило много суббуревых активизаций. Проанализирована совместно пространственная локализация и эволюция во времени интенсивности аврорального электроджета, определяемой по возмущениям геомагнитного поля, и вариабельности геомагнитного поля, определяемой по преобразованию Гильберта от производной поля  $|dB/dt|$ . Пространственные карты в

координатах широта – местное время показывают, что области с наибольшей вариабельностью геомагнитного поля не совпадают с "эпицентрами" суббури и интенсивности электроджета. Также не наблюдается однозначного соответствия во времени между интенсивностью суббури и уровнем вариабельности поля. Моменты наибольшей вариабельности поля совпали с периодами наибольших ГИТ, зарегистрированных в энергетических сетях Кольского полуострова и Карелии. Таким образом, хотя в космической геофизике активно разрабатываются различные модели предсказания интенсивности магнитных бурь и вызванных ими геомагнитных возмущений по наблюдениям межпланетной среды, эти модели не могут быть непосредственно применены для предсказания интенсивности и положения ГИТ, описание вариабельности геомагнитного поля требует разработки отдельных моделей.

Магнитные возмущения на Земле, являющиеся изображениями процессов взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы, можно контролировать, сравнивая временные ряды магнитных записей на земле с параметрами космической погоды. Однако серьезным недостатком анализа наземных магнитограмм является неизбежная вариация магнитного отклика, вызванная постоянными изменениями местоположения станции относительно Солнца и магнитосферы. Идеальным, но невозможным решением этой трудности, которая поможет различать временные и пространственные вариации, будет развертывание «стационарной» обсерватории *in situ* с фиксированным положением в системе солнечно-магнитосферных координат. Однако желаемый результат можно получить с помощью предложенного метода «виртуальных магнитограмм» (ВМ) [Kozyreva *et al.*, 2018].



**Рисунок 12.1. – Вариации индексов геомагнитной активности AE и EI, геомагнитного поля (X-компонента), вариабельности поля dB/dt, и интенсивности геоиндуцированных токов (GIC) в ЛЭП Карелии. Точками указано положение аврорального овала**

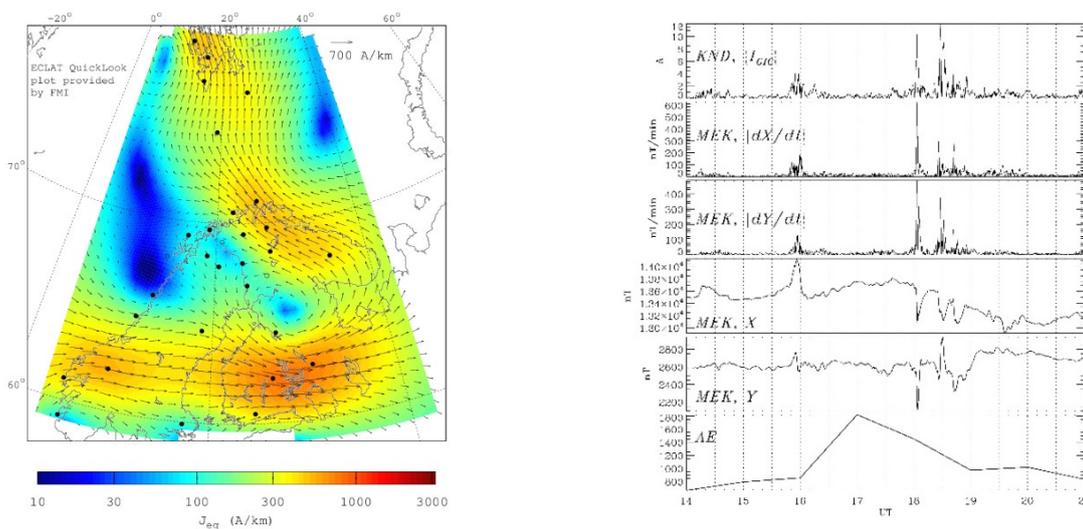
Этот метод был реализован для ключевых областей магнитосферы (ночная авроральная область и дневной касп) как инструмент для мониторинга реакции геомагнитного поля на солнечный ветер и вариации межпланетного магнитного поля. VM для фиксированной системы отсчета реконструируется путем 2D-интерполяции 1-мин магнитограмм от мировой сети магнитных станций (>300). VM были рассчитаны на период с 1994 г. по настоящее время. Широкий спектр исследований космической физики, таких как инициирование суббурь, воздействие вариаций солнечного ветра на ионосферу, реакция ионосферной конвекции на вариации межпланетного магнитного поля (ММП), взаимодействие между полушариями и т.д., выиграют от внедрения VM. База данных рассчитанных VM, а также одновременные межпланетные параметры (плотность и электрическое поле солнечного ветра) и геомагнитные индексы (SYMН, PC, AE), свободно доступны через специально спроектированный сайт (<http://vm.gcras.ru>) для всех заинтересованных исследователей (рисунок 12.1).

#### 12.4. Вариабельность геомагнитного и теллурического полей и гит

Решение задач по расчету и предсказанию ГИТ в технологических системах включает несколько этапов: анализ параметров геомагнитных возмущений с целью создания эмпирической модели и возможного прогноза потенциально опасных

возмущений, оценка электрических полей, возникающих в реальных сетях с учетом геоэлектрических параметров подстилающей поверхности, расчет возможных эффектов в элементах сети. Оказалось, что эта задача не сводится просто к «инженерному» применению результатов космической физики, а потребовала выяснения фундаментальных вопросов о физической природе некоторых магнитосферно-ионосферных явлений. Данные системы регистрации ГИТ Полярного Геофизического Института и Центра Энергетики Севера КНЦ РАН в линиях электропередач Кольского полуострова и Карелии, и данные магнитометров сети IMAGE использованы для исследования характеристик variability геомагнитного поля. Векторная техника представления вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $\Delta B$  и его производной  $dB/dt$  для магнитной бури показала гораздо большую variability величины  $dB/dt$  по сравнению с  $\Delta B$ . Количественная оценка variability с помощью введенного RB-параметра подтвердила, что вариации геомагнитного поля происходят в сравнимой степени как по величине, так и по направлению [Белаховский и др., 2018]. Эти результаты не могут быть объяснены простой моделью протяженного ионосферного тока и показывают важность учета полей мелкомасштабных токовых структур для расчета ГИТ. Ионосферные токи флуктуируют не только в направлении восток-запад, но и в направлении север-юг. Таким образом, ГИТ направлены как в восточно-западном, так и в северно-южном направлениях и представляют опасность для энергетических систем, вытянутых не только в восточно-западном, но в северно-южном направлениях.

Космическая погода активизирует глобальные электромагнитные и плазменные процессы в околоземной среде, однако наибольший риск ГИТ связан не непосредственно с теми процессами с огромным выделением энергии, а с гораздо более слабыми, но быстрыми процессами [Pilipenko et al., 2018]. Рассмотрены несколько типичных примеров таких быстрых процессов и их влияние на линии электропередачи на Кольском полуострове и в Карелии: межпланетные ударные волны; конвективные ионосферные вихри; импульсы на фоне суббури; и иррегулярные пульсации  $Pi3$  (рисунок 12.2). Изменчивость геомагнитного поля изучается с использованием данных магнитометров IMAGE. Во время рассматриваемых импульсных событий ионосферные токи колеблются как в направлениях В-З, так и в С-Ю, и они индуцируют ГИТ в вытянутой в направлении С-Ю линии электропередачи (ЛЭП). Выявление тонкой структуры быстрых геомагнитных вариаций во время бурь и суббурь важно не только с практической точки зрения, но и для развития фундаментальных представлений о динамике околоземного пространства.



**Рисунок 12.2 – Импульсная тонкая структура возмущений магнитного поля (слева) и их вихревая пространственная структура (слева)**

Обычно считается, что интенсивность ГИТ определяется вариациями во времени геомагнитного поля  $dB/dt$ . В системе регистрации ГИТ на Кольском полуострове и в Карелии во время геомагнитных бурь интенсивность ГИТ существенно возрастает. Достаточно ли для оценки величины ГИТ информации о локальной производной  $dB/dt$  - этот вопрос рассматривается в работе [Пилипенко и др., 2018] на примере магнитной бури 7-8 июня 2017 г. Для синтеза вариаций теллурического поля использованы импедансы земной поверхности, рассчитанные в ходе эксперимента BEAR 1998 г. по глубинному магнитотеллурическому зондированию Фенноскандии. Сравнение спектрального состава геомагнитных, теллурических и ГИТ-вариаций показывает, что обычно используемое как мера ГИТ-возмущений временная производная от геомагнитного поля  $dB/dt$  не полностью контролирует интенсивность ГИТ. В спектре ГИТ наблюдается подавление высокочастотной составляющей по сравнению с изменениями  $dB/dt$  из-за частотно-зависимого характера геоэлектрического отклика земной коры.

Задача оценки производных по времени горизонтальных компонент геомагнитного поля  $dB/dt$  и прогноза вероятности возникновения надпороговых возмущений при заданном уровне порога возникает в приложениях, связанных с ГИТ. В работе [Ягова и др., 2018] рассматриваются временная и пространственная структуры  $Pi3$  пульсаций (квази-периоды 100-1000 с), во время которых регистрируются надпороговые значения производных геомагнитного поля на авроральных и субавроральных станциях. Экстремальные значения  $|dB/dt|$  развиваются преимущественно на фоне  $Pi3$  пульсаций сложного гармонического состава. Условия возникновения надпороговых значений  $|dB/dt|$  для субавроральных широт исследуются методом наложенных эпох. Чаще всего экстремальные значения производных регистрируются на главной фазе магнитных бурь или при высокой суббулевой активности.

Вероятность появления надпороговых значений повышается при высоких амплитудах  $P_{i3}$  пульсаций и зависит от их спектрального состава. Задача анализа и прогноза надпороговых возмущений  $|dB/dt|$  осложняется из-за малого масштаба возмущений вдоль параллели и большего – вдоль меридиана. В результате возможно возбуждение ГИТ в линиях электропередач, вытянутых вдоль меридиана, геомагнитными возмущениями, локализованными в узкой долготной области, которые могут быть пропущены при измерениях на разнесенных магнитных станциях.

### **12.5. Статистические модели ионосферы и продольных токов между магнитосферой и ионосферой**

Ионосферу можно рассматривать как основание области, занимаемой магнитосферой. Магнитосфера и ионосфера электродинамически соединены между собой через продольные токи, текущие вдоль силовых линий геомагнитного поля из пограничных слоев магнитосферы в высокоширотную ионосферу, где эти токи возбуждают электрическое поле. Генерация магнитосферных продольных токов (ПТ) является основным механизмом, с помощью которого электромагнитная энергия солнечного ветра поступает в ионосферу. ПТ текут вдоль силовых линий геомагнитного поля между пограничными слоями магнитосферы и ионосферой. В ионосфере ПТ возбуждают горизонтальные электрические поля и токи, которые являются источником геомагнитных вариаций, индуцирующих ГИТ. Таким образом, моделирование последовательности электродинамических процессов в цепи солнечный ветер-магнитосфера-ионосфера-поверхность Земли, вследствие которых могут появляться опасные ГИТ, является важной частью решения задачи проекта. С целью построения модели ПТ проанализирован накопленный за 2015-2018 гг. массив данных измерений вариаций магнитного поля над высокоширотной ионосферой с помощью высокоточных магнитометров на борту группировки спутников SWARM и вычисленных по этим данным значений плотности ПТ. Разработаны алгоритмы сортировки данных по ячейкам пространственной сетки, покрывающей область полярной ионосферы (выше  $50^\circ$  геомагнитной широты). Для построения статистических карт ПТ для различных условий космической погоды массив данных ПТ рассортирован согласно иерархии следующих управляющих параметров: сезон, полушарие, компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). Проведен статистический анализ структуры ПТ для выявления медианных значений и оценки робастности модели ПТ, исходя из имеющегося количества данных измерений при различной интенсивности ММП. Пространственно рассортированные массивы ПТ усреднены и сглажены с помощью набора фильтров. Получена серия статистических карт

ПТ для различных сезонов и ориентации ММП [Lukianova and Bogoutdinov, 2018]. Карты отражают физически обоснованную структуру и эволюцию крупномасштабных ПТ при воздействии изменяющихся условий освещенности ионосферы и параметров солнечного ветра и ММП.

В качестве математического аппарата для описания электродинамики полярной ионосферы используются разработанные численные модели, которые реализованы в виде программных модулей [Лукьянова, 2018]. Комплекс моделей включает в себя модель глобального распределения ионосферного электрического потенциала, которая построена на основе уравнения непрерывности продольных и ионосферных токов. Решение краевой задачи о растекании ионосферных токов позволяет рассчитать распределение ионосферного электрического потенциала (т.е. траектории конвекции ионосферной плазмы) в северном и южном полушариях. В качестве входных данных используется статистические карты ПТ, построенные по данным спутников SWARM и предыдущих миссий. Модель высокоширотной ионосферы позволяет оперативно рассчитывать трехмерную структуру электронной плотности в диапазоне высот 120-500 км при различных гелио-геофизических условиях. Учитывается определяющая роль изменяющихся ионосферных электрических полей, возбуждаемых ПТ магнитосферного происхождения. Концентрация основных ионосферных ионов определяется решением уравнения фотохимического баланса и конвективно-диффузионного уравнения вдоль траектории конвекции плазменных трубок с учётом параметров термосферы.

## **12.6. Применение системного анализа для усовершенствование алгоритмов автоматического распознавания геомагнитных сигналов и помех**

Сравнивались результаты различных алгоритмов автоматического обнаружения волновых пакетов в геомагнитных записях: подход, основанный на преобразовании Фурье во временном окне (F-метод), и подход, основанный на системном анализе (т.н. DPS-метод) [Bogoutdinov et al., 2018]. Используя 1 сек данные среднеширотной станции сети INTERMAGNET, с помощью обоих алгоритмов определялись такие статистические свойства геомагнитных пульсаций Pc3 в диапазоне частот 30-80 мГц как суточные вариации, частотный состав, амплитудные распределения вероятностей и т.д. Суточные распределения вероятности возникновения, определенная обоими методами, имеет широкий пик около полудня и небольшое усиление в ночные часы. Преимуществом DPS-анализа является возможность определить длительность волнового пакета. Этот метод показывает, что средняя продолжительность дневных волновых пакетов статистически больше, чем у ночных событий. Статистические распределения по мощности/амплитуде можно использовать для выводов о физических механизмах сигналов. Кумулятивное

амплитудное распределение, полученное с помощью F-метода, отличается для двух горизонтальных компонент: распределение H-компоненты подвержено влиянию эффекта магнитосферного резонанса и обнаруживает параболическую зависимость в логарифмическом масштабе, тогда как нерезонансная D-компонента имеет степенное распределение. DPS-метод дает почти экспоненциальный спад вероятности с амплитудой для обеих компонент. Разница между статистическими результатами двух методов, вероятно, обусловлена различными зависимостями чувствительности обнаружения от амплитуды сигнала.

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

**Опубликованные в реферируемых журналах статьи в ходе работ по проекту РНФ 16-17-00121 за 2018 г. "Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы"**

#### **Российские журналы**

Агаян С.М., Д.А. Камаев, Ш.Р. Богоутдинов, А.С. Павельев. Гравитационное сглаживание временных рядов (спектральные свойства) // Чебышевский сборник, 2018, т. 19, вып. 4, 11–25. DOI 10.22405/2226-8383-2018-19-4-11-25.

Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н., Характеристики variability геомагнитного поля для изучения воздействия магнитных бурь и суббурь на электроэнергетические системы, Физика Земли, №1, 173–185, 2018.

Лукьянова Р.Ю. Численное моделирование параметров полярной ионосферы // Чебышевский сборник, 2018, т. 19, вып. 4, 89–100.

Пилипенко В.А., В.Б. Белаховский, Я.А. Сахаров, В.Н. Селиванов. Воздействие магнитной бури 7-8 сентября 2017 года на электроэнергетическую систему // Труды Кольского Научного Центра РАН. Гелиогеофизика. Выпуск 4. Т. 5(9). С. 29-35. 2018.

Ягова Н.В., В.А. Пилипенко, Е.Н. Федоров, А.Д. Лхамдондог, Ю.П. Гусев, Геоиндуцированные токи и космическая погода: *Pi3* пульсации и экстремальные значения производных по времени горизонтальных компонент геомагнитного поля, Физика Земли, 2018, № 5, 89–103, doi: 10.1134/S0002333718050137.

## **Международные журналы**

Bogoutdinov Sh.R., N.V. Yagova, V.A. Pilipenko, and S.M. Agayan (2018), A technique for detection of ULF Pc3 waves and their statistical analysis, *Russ. J. Earth. Sci.*, 18, ES6006, doi:10.2205/2018ES000646.

Kozyreva O.V., V.A. Pilipenko, V.B. Belakhovsky, Ya.A. Sakharov, Ground geomagnetic field and GIC response to March 17, 2015 storm, *Earth Planets and Space*, 70:157, doi:10.1186/s40623-018-0933-2, 2018.

Lukianova R., Sh. Bogoutdinov, Statistical maps of field-aligned currents inferred from Swarm: dependence on season and interplanetary magnetic field, *Russ. J. Earth. Science*, 18, doi: [10.2205/2018ES000640](https://doi.org/10.2205/2018ES000640). 2018.

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

Pilipenko, V.A., O.V. Kozyreva, D.A. Lorentzen, and L.J. Baddeley, The correspondence between dayside long-period geomagnetic pulsations and the open-closed field line boundary, *J. Atmospheric Solar-Terrestrial Physics*, 170, 64-74, 2018, doi: 10.1016/j.jastp.2018.02.012.

## **Статьи в сборниках и трудах конференций**

Kozyreva O.V., V.A. Pilipenko, A.A. Soloviev, Virtual magnetograms – new tool for the study of geomagnetic response to the solar wind/IMF driving, *Physics of Auroral Phenomena*”, Proc. XLI Annual Seminar, Apatity, 22-25, 2018.

Pilipenko V.A., V.B. Belakhovsky, Ya.A. Sakharov, V.N. Selivanov, Irregular geomagnetic disturbances embedded into substorms as a cause of induced currents in electric power lines, *Physics of Auroral Phenomena*”, Proc. XLI Annual Seminar, Apatity, 26-29, 2018.

## **Публикация баз данных**

Пилипенко, В., О. Козырева, А. Соловьёв, М. Энгебрессон (2018). База данных "Virtual Magnetograms Database", ГЦ РАН, М., <https://doi.org/10.2205/vm-database>.

### **13. Грант РФФИ № 17-17-01215 «Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа»**

Номер госрегистрации: АААА-А18-118021990128-8

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

Ответственный исполнитель: д.т.н. В. Г. Гетманов

#### **13.1. Метод моделирования движения КВМ в гелиосфере**

Образования корональных выбросов масс (КВМ) и их движения являются принципиально стохастическими по своей природе. Метод построения феноменологической модели движений КВМ в гелиосфере, основанный на интегрировании стохастических дифференциальных уравнений (СДУ), вносит существенный реализм в решения задач диагностики геомагнитных бурь.

Предложена сформированная схема модельного движения КВМ для 2D-случая; заданы модельные вращения Земли и апертуры мюонного годоскопа (МГ) УРАГАН. Структура модельного КВМ определена конечным набором составляющих, движущихся по случайным траекториям, которые реализуются на основе интегрирования СДУ. Расположением дискретных составляющих определена функция распределения плотности КВМ по пространству и времени. Моменты времени генерирования КВМ были смоделированы в виде пуассоновского процесса. Геометрические параметры КВМ смоделированы равномерно распределёнными случайными числами. Заданы случайные начальные положения и скорости для составляющих КВМ. Размерность системы СДУ определена количеством составляющих модельного КВМ. Заданы коэффициенты сноса и диффузии для составляющих и стандартные винеровские процессы для имитации случайных возмущений КВМ. Результат СДУ-метода моделирования представлен кадрами перемещающегося КВМ с изменяющейся во времени геометрией.

Задачей этого этапа работ являлось обобщение рассмотрения 3D-моделирования с учтёнными пространственными движениями КВМ и вращения Земли. Разработанная феноменологическая модель движений КВМ с использованием СДУ является, фактически, многопараметрической и предназначена для обеспечения решения задач идентификации КВМ с последующей ранней диагностикой геомагнитной бури, алгоритмические решения которой предполагается реализовать в течение следующего года выполнения проекта.

#### **13.2. Метод расчёта траекторий движения протонов космических лучей**

Эта часть работ посвящена построению метода расчёта траекторий движения протонов космических лучей, образующих мюоны, треки которых формируют угловые

матрицы потока мюонов, регистрируемых мюонным годоскопом.

Гелиосферные возмущения изменяют состояние межпланетного магнитного поля (ММП), что приводит к изменению траекторий заряженных первичных космических лучей (ПКЛ), достигающих атмосферы Земли. Это приводит к изменению потока атмосферных мюонов, образующегося при взаимодействии ПКЛ с ядрами атомов атмосферы. Для сопоставления траекторий мюонов, зарегистрированных в наземном детекторе, с траекториями частиц ПКЛ в гелиосфере строятся обратные траектории.

На обратной траектории частиц от детектора в межпланетное пространство можно выделить следующие области: атмосфера, магнитное поле Земли (МПЗ) и межпланетное магнитное поле (ММП). Для описания используются: модель атмосферы NRLMSISE-00; модели магнитного поля Земли Н.А. Цыганенко TS04 и GEOPACK-2008; модель магнитного поля гелиосферы из работы P. Lippari. Модели МПЗ используются для построения асимптотических направлений протонов, которые представляют собой обратные траектории от точки первого взаимодействия протонов с атомами атмосферы до магнитопаузы. Мюон прослеживается от детектора до высоты, на которой происходит его генерация. При этом учитываются энергетические потери. Используется пошаговый метод построения обратной траектории и на каждом шаге отслеживаются параметры атмосферы и магнитного поля.

Рассматривались траектории мюонов и родительских протонов и ядер гелия различных энергий для положительной и отрицательной полярности Солнца. Показано, что траектории первичных частиц для мюонов, регистрируемых на поверхности Земли, зависят от полярности Солнца. Для энергий первичных частиц от 10 до 100 ГэВ при  $A < 0$  наблюдаются в основном изменения анизотропии частиц от гелиосферных возмущений преимущественно с западных направлений, а при  $A > 0$  – с восточных направлений. При пересечении Землей гелиосферного токового слоя наблюдается резкое изменение траекторий первичных частиц.

Было изучено поведение траекторий протонов с энергией 20 ГэВ в спокойном состоянии ММП и когда Земля находилась в замкнутой области аномальной  $Bz$  (30 нТл) 22 июня в 4 и 16 часов при  $A < 0$  и  $A > 0$  полярностях Солнца. Область аномального  $Bz$  рассматривалась в двух положениях приблизительно  $R = (0,85-0,9)$  и  $R = (1,05-1,1)$  а.е. от Солнца. В выбранную дату Земля расположена выше гелиосферного токового слоя. Показано, что Земля находится внутри закрытой области аномального  $Bz$  и при этом ограничивается доступ первичных протонов извне. Частично траектории первичных протонов выходят за пределы области аномального  $Bz$  при  $A < 0$  или не попадают внутрь при  $A > 0$ . Влияние аномальной области  $Bz$  сильнее проявляется, когда  $A > 0$ ,  $Bz = -30$  нТл и  $A < 0$ ,

$B_z = +30$  нТ, и слабее для всех остальных случаев.

### **13.3. Метод ранней идентификации корональных выбросов на основе матриц наблюдений МГ**

Для реализации метода разработана необходимая фильтрация исходных и нормированных матриц наблюдений МГ; представлены три варианта метода ранней идентификации КВМ на основе исходных и нормированных матриц наблюдений МГ, в которых использована разработанная фильтрация.

Фильтрация исходных и нормированных МГ-матриц предназначена для их предварительной цифровой обработки, которая необходима для эффективной работы разработанных методов ранней идентификации КВМ, связанных с распознаванием малых Форбуш-эффектов (ФЭ). Рассмотрены два алгоритма фильтрации МГ-матриц.

Первый алгоритм фильтрации предназначен для устранения суточных вариаций потоков мюонов (ПМ) в исходных МГ-матрицах и состоит в построении двумерного высокочастотного фильтра модуляционных составляющих для последовательностей указанных матриц. Структура предлагаемого фильтра основана на операциях быстродействующих поэлементных матричных умножений. Этот вариант фильтрация позволяет снизить амплитуды суточных вариаций в наблюдениях МГ-матриц при распознавании низкочастотных ФЭ.

Второй алгоритм фильтрации предназначен для обеспечения преобразования исходных МГ-матриц в нормированные с помощью аппаратной функции МГ УРАГАН. Для реализации фильтрации второго варианта разработан метод вычисления оценок аппаратной функции МГ УРАГАН, базирующийся на математической технологии статистических испытаний. Построена модель конструкции МГ, произведён учёт функции ослабления интенсивности ПМ в атмосфере и разработан алгоритм оценивания аппаратной функции. Произведён анализ применения вычисленной оценки аппаратной функции годоскопа для вариантов входных модельных функций распределений интенсивностей ПМ. Рассмотренные два алгоритма фильтрации МГ-матриц предназначены для использования в решениях задач идентификации.

Для первого варианта метода ранней идентификации предварительно реализована высокочастотная фильтрация последовательности МГ-матриц для устранения суточных вариаций интенсивностей ПМ. Введены локальный эталонный интервал, на котором вычислены оценки математических ожиданий и дисперсий для каждой из ячеек последовательности исходных МГ-матриц, принадлежащих локальному эталонному интервалу. На основе вычисленных оценок для заданной доверительной вероятности произведено нахождение системы эталонных доверительных интервалов. Введена система

скользящих локальных интервалов с заданной длительностью и вычислена система скользящих доверительных интервалов. Вводится критериальная функция, определяющая степень перекрытия эталонных и скользящих доверительных интервалов. Вычисленная критериальная функция сравнивается с заданным порогом, принимается решение об аномальности ячеек для временного ряда скользящих МГ-матриц.

Для временных рядов МГ-матриц введены последовательности индикаторных матриц, ячейки которых принимают значение единица, в случае аномальности или ноль – в противоположном случае. Индикаторные матрицы явились исходными для решения задач ранней идентификации возможных КВМ.

Снижение погрешностей реализовано на основе пространственно-временной фильтрации для индикаторных матриц. Пространственная фильтрация позволяет в укрупнённом масштабе решать задачу ранней идентификации КВМ. Для выявления изменений на заданной последовательности скользящих интервалов вводится временная фильтрация на основе кусочно-линейных аппроксимационных функций.

Первый вариант метода ранней идентификации базируется на возможности выделения в последовательности индикаторных матриц, подвергнутых пространственно-временной фильтрации, областей аномальности, которые должны позволить обеспечить решение задачи ранней идентификации. Выполнены предварительные подтверждающие вычислительные эксперименты.

Для второго варианта метода ранней идентификации предварительно реализованы: 1. высокочастотная фильтрация последовательности МГ-матриц для устранения суточных вариаций интенсивностей ПМ; 2. фильтрация исходных матриц на основе оценок аппаратной функции для вычисления нормализованных МГ-матриц. Для второго варианта введены: 1. функция суммарной интенсивности, вычисление которой основано на подсчёте суммы значений нормализованных МГ-матриц; 2. функция суммарной аномальности на основе индикаторных матриц, вычисление которой базируется на подсчёте числа аномальных ячеек, отнесённому к общему числу ячеек нормализованных МГ-матриц. Величины данных функций времени пропорциональны, определённым образом, интенсивности потока мюонов, падающего на апертуру МГ. Указанным функциям ставятся в соответствие функция Dst-индексов геомагнитной активности как функция времени и соответствующие области геомагнитной активности.

Анализ функций суммарной интенсивности и суммарной анизотропии и функции Dst-индексов во временной области показывает, что почти всем отмеченным участкам с геомагнитной активностью предшествуют области с понижениями для введённых функций. Причём, области с понижениями возникают, как правило, с опережением на  $\approx 1,5$ -

2,0 суток по отношению к областям с геомагнитной активностью. Можно сделать вывод, что в МГ-матрицах содержится информация, позволяющая принять решение о ранней идентификации КВМ. На основе функций суммарной интенсивности и суммарной аномальности возможна реализация процедур принятия решений о ранней идентификации КВМ.

Дальнейшее продвижение в решении задачи ранней идентификации КВМ осуществлено на основе отыскания корреляционных связей между функцией Dst-индексов и функциями суммарной интенсивности и суммарной аномальности. С этой целью вычислялись оценки функций взаимной корреляции Пирсона в скользящем режиме для выбранного интервала наблюдений. Анализ 2D-изображений вычисленных скользящих функций взаимной корреляции Пирсона, соответствующих временным участкам геомагнитной активности, позволил сделать вывод о существенной корреляционной связи введённых функций суммарной интенсивности и суммарной аномальности и функции Dst-индексов относительно участков с геомагнитной активностью с тем же опережением по времени величиной  $\approx 1,5-2,0$  суток. Можно сделать дополнительный вывод, что в МГ-матрицах содержится информация, позволяющая принять решение о ранней идентификации КВМ, и функции суммарной интенсивности и суммарной аномальности могут служить основой построения функций-предикторов для ранней идентификации КВМ. Произведены необходимые вычислительные эксперименты, подтверждающие сделанный вывод.

Для третьего метода ранней идентификации КВМ реализованы:

1. высокочастотная фильтрация последовательности МГ-матриц для устранения суточных вариаций интенсивностей ПМ;
2. фильтрация исходных МГ-матриц с применением оценок введённых усреднённых аппаратных функций.

Полученные при этом в результате фильтрации по алгоритмам 1 и 2 нормализованные МГ-матрицы подвергались низкочастотной фильтрации для устранения оставшихся погрешностей, вызванных особенностями конструкции МГ. В отфильтрованных подобным образом нормализованных МГ-матрицах была реализована пространственная фильтрация для устранения шумов. Были произведены вычислительные эксперименты; рассмотрение последовательности подобным образом пространственно отфильтрованных МГ-матриц позволяет распознать возможные аномалии по пространству и времени и реализовать раннюю идентификацию КВМ.

#### **13.4. Метода анализа матриц наблюдений мюонного годоскопа и выделения «образа» КВМ на основе вычисленной анизотропии углового распределения потока мюонов**

Проанализированы временные ряды двумерных угловых матриц данных мюонного годоскопа за 2017–2018 гг. Для контроля стабильности работы установки производилась запись мониторинговой информации. Периоды профилактики, моменты останова, интервалы некорректной работы и интервалы отсутствия данных из-за неполадок в считывающей аппаратуре отражаются в ежемесячном паспорте работы установки. По данным паспортов с помощью специальной программы формируются «чистые» данные, пригодные для физического анализа.

Таким образом, за период 2012-2017 гг. подготовлены временные ряды матриц темпа счета супермодулей (СМ) УРАГАН (как минутные, так и часовые) следующих типов:  $M(\varphi, \theta)$ ,  $M_{sp}(\varphi, \theta)$ ,  $M_{crt}(\varphi, \theta)$ ,  $M(\theta_x, \theta_y)$ ,  $M(\text{tg}\theta_x, \text{tg}\theta_y)$  (sp – с коррекцией на давление, crt – с коррекцией на давление и на температуру атмосферы). По 10-минутным данным МГ УРАГАН (с поправкой на барометрический и температурный эффекты) проведен поиск Форбуш-понижений (ФП) с амплитудой падения  $> 0,5 \%$ . За период 2006–2011 гг. ранее было отобрано 33 ФП, за 2012–2017 гг. в текущей работе отобрано 56 ФП. Для каждого ФП составлен паспорт. В нем полученные характеристики вариаций потока мюонов были сопоставлены с параметрами солнечного ветра (СВ), межпланетного магнитного поля (ММП) и магнитосферы Земли (информация базы данных спутника ACE). Для каждого периода ФП были проанализированы параметры, характеризующие ММП – вектор магнитной индукции ( $B$ ) и его проекция на ось  $Z$  ( $B_z$ ) и солнечный ветер – скорость ( $V$ , км/с), плотность ( $P$ , см<sup>-3</sup>) и температура ( $T$ , К°). Проанализированы  $K_p$  и  $Dst$  индексы геомагнитной активности, описывающие изменения магнитного поля Земли во время ФП.

Получены корреляции параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и амплитуд и времени падения ФП по данным МГ УРАГАН. Проведено сопоставление полученных корреляций за 2006–2011 гг. (включает период минимума солнечной активности) и 2012-2017 гг. (включает период максимума солнечной активности). Сравнение показывает значительное изменение параметров корреляций при переходе от минимума к максимуму солнечной активности. Полученный результат требует дальнейшего анализа.

Также были рассмотрены ряды мюонографий гелиосферы по данным мюонного годоскопа УРАГАН за 2017-2018 гг.

Проведен отбор КВМ на спаде солнечной активности в 2017 г. Отбор КВМ осуществлялся по данным базы данных САСТus (данные коронографа LASCO C2/C3). Для определения геоэффективности КВМ использовались данные OMNI о состоянии ближней

гелиосферы и магнитосферы. Для этого были выбраны индукция межпланетного магнитного поля (ММП) и скорость солнечного ветра (СВ) для оценки состояния околоземного пространства; для оценки геомагнитной обстановки были выбраны индексы геомагнитной активности  $K_p$  и  $Dst$ .

В результате проведенного статистического анализа этих данных за 2007–2017 гг. были определены критерии для идентификации геоэффективности КВМ. Для всех рассматриваемых событий вычислялись: средние значения магнитной индукции и скорости, максимальное значение  $K_p$ -индекса и минимальное значение  $Dst$ -индекса за промежуток времени, за который КВМ может пройти расстояние 2 а.е., при этом из расчета исключаются соответствующие параметры в течение времени, за которое КВМ проходит первые 0,5 а.е. Определение промежутка времени осуществлялось на основе данных о средней скорости выброса. В 2017 году всего было отобрано 55 событий, из них 36 геоэффективных, и в 2018 году – 8 событий, из которых 3 геоэффективных. Для каждого события были построены последовательности мюнографий в GEO системе координат, т.е. сформированы матрица изменений с коррекцией на барометрический эффект (по каждой ячейке) и формы углового распределения. Затем на матрицах изменений были выделены области с отклонением больше трех сигм. Эти области обозначаются как области деформаций. Для преобразования мюнографий потока мюонов в угловое распределение родительских протонов на границе магнитопаузы разработана процедура трансформации матриц вариаций углового распределения потока мюонов в LAB системе координат, наблюдаемых на уровне детектора, на границу магнитопаузы в систему координат GSE. При этом предполагается, что мюоны сохраняют направления породивших их космических лучей. Для каждой угловой ячейки матрицы были рассчитаны асимптотические направления частиц с учетом пороговой энергии ( $\sim 0,3$  ГэВ), направления трека мюона в детекторе и энергии протона в зоне генерации. В результате угловые координаты ячеек матриц изменений из GEO системы отображаются в систему координат GSE. Для каждого события были сформированы наборы часовых мюнографий, которые использовались для исследования деформаций углового распределения потока мюонов.

Для четвёртого метода предложено выделение «образа» КВМ на основе вычисления областей анизотропии углового распределения потока мюонов в мюнографиях МГ, связанных с движением КВМ в гелиосфере.

Для вычислений используются объединённые 1-часовые и 24-часовые матрицы  $M_{sp}(\varphi, \theta)$ . Проводится аппроксимация объединённых часовых и 24-часовых матриц  $M_{sp}(\varphi, \theta)$ , функций телесного угла ячейки матрицы в диапазоне зенитных углов от 0 до  $76^\circ$ . Формируются результаты аппроксимации. Объединённые матрицы сглаживаются,

формируется матрица изменений углового распределения, в ячейках которой содержатся отклонения чисел событий в единицах статистической погрешности. Дополнительно формируется матрица изменений с коррекцией формы углового распределения. Затем на матрицах изменений выделяются области (не более десяти) с заданным СКО. Эти области обозначаются как области деформаций.

С помощью предварительно рассчитанных асимптотических направлений угловые координаты ячеек матриц изменений из лабораторной системы отображаются в систему координат GSE.

Для каждой области деформации вычисляются: размер телесного угла в системе GSE, GSE-широта и GSE-долгота пикового значения отклонения и его величина в единицах статистической погрешности, пиковое значение деформации в процентах и его угловые координаты  $(\theta, \varphi)$  в лабораторной системе координат. Временные ряды характеристик выделенных областей деформаций сохраняются. Эти ряды используются для построения графиков GSE-долготы направлений пиковых значений областей и пич-угла (угла в GSE-системе между направлением пикового значения области и направлением линии межпланетного магнитного поля при скорости солнечного ветра 400 км/с) в зависимости от времени. Размер точек на графиках зависит от размера телесного угла области деформации, а цвет – от величины пикового значения отклонения внутри области. На всех графиках отображаются только области с размером телесного угла более 0,02 ср. На графиках с пич-углом отображаются области без ограничения по GSE-широте.

С помощью предложенного способа визуализации областей анизотропии в угловом распределении мюонов и их отображении в матричном виде в GSE-системе координат можно анализировать глубину деформации, зенитный и азимутальный углы центров областей в локальной системе, долготу и широту в GSE-системе. Временной ряд часовых кадров данных МГ УРАГАН дает возможность изучения динамики развития областей анизотропии и изучения вызвавших их процессов в гелиосфере.

### **13.5. Ранняя диагностика геомагнитных бурь на основе моделей координат движений центров КВМ и наблюдений их угловых положений**

Предполагается для оценивания угловых положений КВМ использовать информацию от индикаторных МГ-матриц для вычисления соответствующих моментных характеристик. Предложен подход для определения погрешностей оценок угловых положений КВМ.

Разработан метод ранней диагностики геомагнитных бурь на основе параметрических моделей координат движений центров КВМ и наблюдений угловых

положений центров КВМ. Введена функция прогноза расстояния между Землёй и центрами КВМ, сформирована процедура принятия решений о ранней диагностике КВМ. Разработан алгоритм диагностики, основанный на введённом функционале обобщённой триангуляции и его минимизации. Представлен пример вычисления функции прогноза расстояния Земля-КВМ и процедуры принятия решения на основе моделей координат и модельных наблюдений угловых положений центров КВМ. Определена эффективность процедуры принятия решений для алгоритма ранней диагностики геомагнитных бурь с помощью статистического моделирования – разработаны алгоритмы вычисления оценок вероятностей ложных обнаружений и пропусков КВМ. Реализованы вычислительные эксперименты, подтвердившие эффективность предложенных решений.

## **14. Грант РФФ № 17-77-20034 «Разработка карт районирования характеристик геомагнитной активности для территории Российской Федерации».**

**Номер госрегистрации: АААА-А18-118021990123-3**

**Руководитель: к.ф.-м.н. Р.И. Красноперов**

Главной задачей, решаемой в рамках проекта, является создание первой для территории РФ серии карт пространственного распределения параметров геомагнитной активности, отображающих вероятностные и детерминистские характеристики variability геомагнитного поля. В 2017–2018 гг. в рамках проекта решались следующие основные задачи: формирование базы исходных геомагнитных данных проекта; первичный анализ геомагнитных данных, валидация и коррекция; адаптация и тестирование алгоритмов статистического анализа геомагнитных данных.

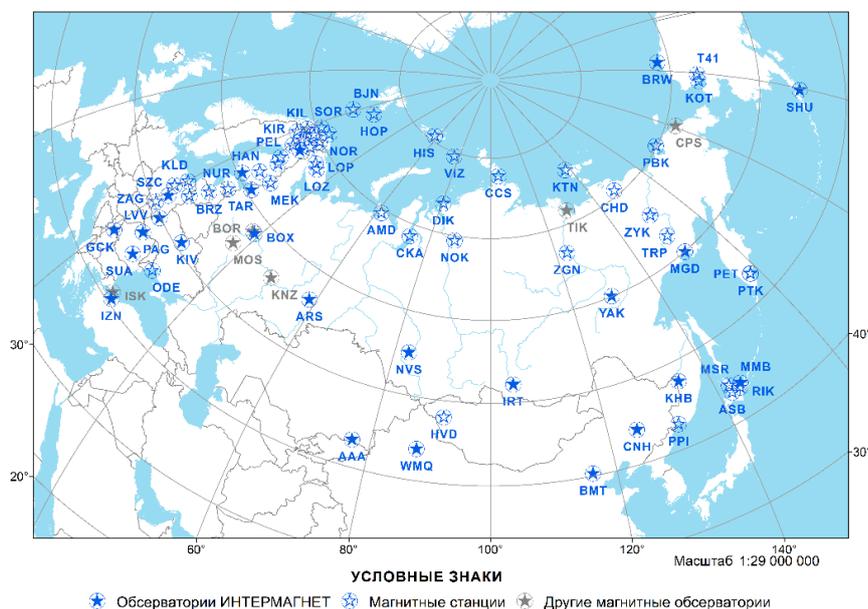
### **14.1 Накопление магнитных данных с обсерваторий и станций территории РФ в первичную экспериментальную базу данных**

В рамках реализации первого этапа проекта в силу специфики исходных данных значительные усилия участников были сосредоточены на формирование однородной базы исходных данных (в том числе и в виде реляционной СУБД), что необходимо для эффективного решения вопросов автоматизации процедур анализа данных. Исходной информацией для выполнения проекта являются магнитометрические данные по территории России и сопредельных государств. К таким данным относятся данные наблюдений магнитных обсерваторий и станций, а также индексы геомагнитной активности.

Основным источником обсерваторских наблюдений является международная сеть геомагнитных наблюдений INTERMAGNET (<http://intermagnet.org>). Были отобраны 27 обсерваторий, принадлежащих этой сети и расположенных в пределах России и на территории сопредельных государств. В рамках реализации проекта было принято решение использовать окончательные данные. По отобраным обсерваториям были получены окончательные данные магнитных наблюдений с 1991 по 2016 годы включительно. В дальнейшем в ходе реализации проекта база обсерваторских данных будет пополняться данными за 2017 и последующие годы.

Основным источником данных магнитных станций для проекта была выбрана сеть SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>). Были отобраны 76 станций этой сети, находящихся на территории России и сопредельных государств. По отобранным станциям были получены данные за весь доступный период наблюдений с 1980 по 2017 годы.

Данные по магнитным станциям SuperMAG были также дополнены данными по другим сетям магнитных наблюдений. Из сети наблюдений IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>) были получены данные по 12 станциям, которые обслуживает Финский метеорологический институт (FMI), за период с 2007 по апрель 2018 года и по большему количеству станций за 2010–2015 годы. Из сети наблюдений Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ) были получены данные по 8 российским полярным станциям за период с 2007 по начало 2018 года. Из сети наблюдений ИЗМИРАН были получены данные по двум станциям: Калининград (KLD) за 2013–2016 годы и Москва (MOS) за 2009–2011 годы. В качестве источника данных по российским обсерваториям и станциям также использовался Российско-украинский центр геомагнитных данных (<http://geomag.gcras.ru/>), входящий в ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» Геофизического центра РАН (<http://ckp.gcras.ru/>). На (рис. 14.1) представлена сеть геомагнитных станций и обсерваторий, данные по которым планируется использовать в рамках исследований по проекту.



**Рисунок 14.1 – Исследуемая сеть геомагнитных обсерваторий и станций**

Полученные в ходе проекта данные по индексам геомагнитной активности включают в себя: индексы AE, AU, AL, AO за 1980–2017 годы; индексы ASY-D, ASY-H, SYM-D, SYM-H за 1981–2017 годы; Kp-индекс за 2001–2017 годы. Данные были взяты из Мирового центра данных по геомагнетизму в Киото (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>). Также

по отдельным обсерваториям были собраны данные по К-индексу за 2005–2016 годы. Данные по К-индексу были взяты с сайта обсерватории «Борок» (BOX) и Мирового центра данных по Солнечно-Земной физике (<http://www.wdcb.ru/stp/data.ru.html>).

#### **14.2. Оценка качества исходных данных, их отбраковка**

Оценка качества данных состояла из двух этапов: оценка доступности данных и очистка данных от помех техногенной природы. Как было замечено выше, окончательные данные по обсерваториям INTERMAGNET уже являются очищенными. В них внесены поправки за изменение базисной линии, удалены выбросы и, по возможности, заполнены пропуски. Таким образом, для них не требуется проведение дополнительной очистки данных.

Для оценки доступности данных в базе исходных данных были созданы функции, позволяющие для заданных сетей наблюдений, обсерватории или станции получить процент доступных данных по годам, месяцам или дням. Под доступностью данных понимается отношение количества измерений со значениями, отличающимися от пропущенных значений, к общему количеству измерений, которое должно было быть сделано за год при заданной частоте дискретизации данных. Доступность данных считается только по тем годам, для которых в принципе есть измерения по данной обсерватории или станции.

Для выбранных станций сети SuperMAG общая доступность данных составляет 86% по компонентам X, Y и Z и 0% для полного вектора F, поскольку F на станциях SuperMAG не измеряется. Для выбранных обсерваторий сети INTERMAGNET доступность данных по компонентам X, Y и Z составляет 98%, а для F – 71%.

Очистка данных проводилась в несколько этапов. На первом этапе производилось устранение явных искусственных скачков методом порогового сравнения. Допустимые изменения магнитного поля вычислялись индивидуально для каждой станции в соответствии с местоположением станции (широтой) и известных исторических значений максимальных вариаций магнитного поля (нижнее пороговое значение для К-индекса в 9 баллов).

На втором этапе интерполировались среднесуточные значения для получения обще годового тренда по каждой компоненте магнитного поля Земли. По результатам вычислений вводились поправки для каждого момента времени, позволяющие устранить приборные эффекты в условиях отсутствия данных абсолютных измерений.

На следующем этапе выполнялось нахождение временных интервалов, соответствующих естественным магнитным возмущениям. Для поиска моментов времени

начала магнитных бурь и суббурь использовались индекс SYM-H совместно с индексом DST. Обнаруженные интервалы времени накладывались на интервалы ночного локального времени каждой станции, что позволяло локализовать естественные возмущения в рядах данных компонент магнитного поля.

На завершающем этапе использовался алгоритм локализации искусственных выбросов в периоды времени, соответствующие спокойному магнитному полю. Такие интервалы получались исключением интервалов естественных возмущений поля, определенных на предыдущем этапе. Для подтверждения искусственной природы найденного выброса везде, где это было возможно, использовалось сравнение с обсерваториями или станциями, лежащими на долготе, близкой к долготе рассматриваемой станции.

### **14.3. Формирование упорядоченной базы исходных магнитных данных для дальнейшего их анализа**

База исходных данных для дальнейшего анализа создана в двух вариантах: файловое хранилище исходных данных на FTP-сервере проекта и реляционная база данных под управлением СУБД MySQL. Для хранения файлов данных магнитных измерений на обсерваториях и станциях на FTP-сервере был выбран текстовый формат IAGA-2002 и ориентация компонент магнитного поля XYZ. Другая возможная ориентация HDZ не была выбрана, поскольку окончательные данные обсерваторий INTERMAGNET представлены в ориентации XYZ вне зависимости от ориентации магнитометров.

Соответственно, файлы, полученные из разных сетей сбора геомагнитных данных в разных форматах, были приведены к единому формату IAGA-2002 и, при необходимости, вариации компонент магнитного поля переведены в систему координат XYZ. Для конвертации данных использовалась свободно доступная библиотека Geomag Algorithms (<https://github.com/usgs/geomag-algorithms>), в которую были добавлены возможности чтения нужных форматов данных и перевода системы координат в XYZ. В файловом хранилище исходных данных хранятся как исходные файлы в разных форматах и ориентациях, полученные от сетей наблюдений за магнитным полем Земли, так и файлы, сконвертированные в формат IAGA-2002 с ориентацией XYZ. После конвертации данные были загружены в реляционную базу данных под управлением СУБД MySQL.

В СУБД данные организованы в зависимости от их типа и частоты дискретизации. Типы данных – это предварительные (вариационные) (preliminary) и окончательные (definitive) данные наблюдений компонент магнитного поля Земли и индексы геомагнитной активности. Наиболее распространенной частотой дискретизации используемых данных

является 1 минута, но для данных сети наблюдений IMAGE частота дискретизации составляет 10 секунд. Каждому типу данных и частоте дискретизации соответствует отдельная таблица базы данных. Для данных наблюдений компонент магнитного поля Земли вместе с данными хранится внутренний код источника данных, соответствующий различным сетям геомагнитных наблюдений (SuperMAG, IMAGE, INTERMAGNET, ААНИИ, ИЗМИРАН и т.д.). Это позволяет хранить данные по одной и той же обсерватории или станции за один и тот же период времени, но полученные из разных сетей наблюдений.

Для данных наблюдений магнитного поля Земли, загруженных в базу данных, были рассчитаны для дальнейшего анализа такие индикаторы геомагнитной активности, как максимальная амплитуда, скорость изменения  $dB/dt$  и мера аномальности [Gvishiani *et al.*, 2016]. Мера аномальности является оригинальной разработкой Геофизического центра РАН [Soloviev *et al.*, 2016] на основе нового подхода к анализу данных под названием дискретный математический анализ (ДМА).

Для доступа к данным, хранящимся в СУБД, создан служебный веб-интерфейс, позволяющий получать данные для выбранной сети наблюдений, обсерватории или станции, входящей в эту сеть наблюдений, за указанный промежуток времени. Данная функция доступна участникам проекта. Таким образом, создана единообразная база данных наблюдений магнитного поля Земли и индексов геомагнитной активности в виде файлового хранилища на FTP-сервере и в виде реляционной базы данных под управлением СУБД MySQL.

#### **14.4. Адаптация и испытания алгоритмов статистического анализа данных для определения статистических характеристик геомагнитных сигналов**

Для проведения статистического анализа данных магнитных измерений была избрана характеристика вариабельности направлений вектора магнитного поля на малых интервалах времени. На первоначальном этапе это 10 минут для вариометрических данных с частотой дискретизации, равной одной минуте. Направление вектора задается точкой на единичной сфере. В ходе проведенного анализа выявлено, что для значительной части вариационных данных соответствующие направления отклонений от тренда поля имеют выраженную тенденцию к поляризации в некоторой плоскости. Таким образом, в ходе данного этапа предложено исследовать следующие новые характеристики: параметры плоскости поляризации и их зависимость от времени, статистику углов отклонения от плоскости поляризации также в зависимости от рассматриваемого интервала времени и уровня магнитной активности.

Общий подход предлагаемого алгоритма заключается в следующем. Для

выбранного интервала времен находится аппроксимация второго порядка поведения каждой из компонент  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (в единицах измерения вариометра) и вычитается из истинного значения компоненты. Далее для результата вычитания будет использоваться термин «шум» на выбранном интервале времени. Каждое измерение вектора шума нормализуется с тем, чтобы длина соответствующего вектора стала бы единичной, и собирается статистика шумов за достаточный интервал времени наблюдений. Полученные данные удобно изображать точками на единичной сфере в трехмерном пространстве. Определяется плоскость поляризации стандартным путем вычисления главных осей неотрицательно определенной самосопряженной матрицы ориентаций. Каждое направление из выборки составляет некоторый угол с таким образом найденной плоскостью, этот угол принимает значения в интервале  $(-90, +90)$  градусов и в дальнейшем используется как дополнительная скалярная характеристика шума во времени. Также представляют определенный интерес проекции шумовых векторов в каждый момент времени на горизонтальную плоскость  $XY$  (а также на поляризационную плоскость). Обнаружено, что в этой проекции азимут распределен далеко не равномерно, а имеются два четко выраженных кластера, различающихся поворотом на 180 градусов.

Эти характеристики, как показывает предварительный анализ с использованием прототипа алгоритма, зависят от места установки вариометра. На данном этапе проводилась проверка настройки созданных рабочих версий алгоритмов. Для набора магнитных станций и обсерваторий, были проанализированы статистические свойства как прямых измерений компонент магнитного поля (в случае обсерваторий), так и измерений с вариометров (в случае станций). Основные наборы данных для тестирования работы алгоритмов были выбраны по нескольким разным критериям.

Во-первых, это были несколько российских обсерваторий стандарта INTERMAGNET – Арти (ARS), Климовская (KLI), Магадан (MGD), Новосибирск (NVS), Санкт-Петербург (SPG) в спокойный период и в период магнитной бури. Во-вторых, были выбраны группы обсерваторий и вариометрических станций так, чтобы они были расположены вдоль выбранного меридиана (для оценивания зависимости эффектов от наклона и интенсивности магнитного поля) и вдоль параллели (для оценки зависимости эффектов от прочих факторов при приблизительно одинаковом магнитном склонении).

Принципиально это исследование показало отсутствие явной зависимости степени поляризации шумового вектора от одной только географической широты обсерватории, одновременно с явной зависимостью от конкретных координат расположения обсерватории, причем в отдельных локациях эффект поляризации практически отсутствует. Кроме того, были рассмотрены синхронные записи от 17.03.2013 (магнитная буря в

утренние часы) по достаточно плотной сети вариометров IMAGE в Северо-Восточной Европе вблизи границы России.

#### **14.5. Адаптация и испытания алгоритмов распознавания экстремальных событий на временных рядах к задачам анализа записей магнитных наблюдений**

Исследование приведенных выше параметров проводилось методом определения квантильных характеристик за достаточный интервал времени с тем, чтобы получить выраженный в терминах локальной статистики признак аномального (т.е. экстремального) поведения магнитного поля. Метод выделения квантилей для характеристики направлений по сути является развитием общего классического подхода для изучения поведения скалярных характеристик временного ряда — составление достаточно большой выборки значений, привязанной к однородному желательному стационарному поведению; вычисление квантильных характеристик на основе этой выборки, для распознавания отдельных экстремальных периодов наблюдений. Построение квантильных характеристик указывает на относительную суммарную длительность определенного экстремального поведения в прошлом, поскольку квантиль статистически определен по имеющимся наблюдениям. В то же время использование таким образом ранее найденных квантилей для текущих наблюдений позволяет с одной стороны идентифицировать экстремальные явления реального времени, с другой – постоянно уточнять значения квантилей с учетом новых данных. Таким образом, возникает динамическая схема распознавания экстремальных явлений.

Соответствующий прототип алгоритма применен к данным интенсивности магнитного поля, а также к отдельным скалярным характеристикам, связанным с вариабельностью направлений, получаемых из записей вариометров. Проведен ряд расчетов для определения зависимости характеристик плоскости поляризации шумового вектора от внешних условий. При этом выбирались разные периоды магнитной активности, различные локации обсерваторий и станций с целью проверки соответствия статистического (определение квантилей) критерия выделения экстремальных возмущений количественным характеристикам магнитных бурь и спокойной обстановки. Для этого формировались различные выборки исходных данных:

- анализ данных обсерваторий, расположенных вблизи одного меридиана;
- анализ данных обсерваторий, расположенных одной параллели;
- выборка одного и того же часа на протяжении нескольких дней для одной обсерватории;

– анализ данных по ряду обсерваторий за спокойные и в возмущенные дни.

По результатам обработки данных обсерваторий алгоритм квантильного выделения экстремалей порождает количественную характеристику, соответствующую пороговым значениям интенсивности поля и/или компонент, а также характеристик, связанных с производной этих же характеристик поля по времени.

На текущем этапе проекта внимание было сосредоточено на поведении производных, поскольку из более раннего анализа более-менее известно, что экстремальные (по интенсивности) значения поля сопровождаются экстремальными же по интенсивности значениями производной. Выявлено, что соотношение экстремальности интенсивностей производных и направлений производных совершенно иное — они антикоррелированы. Большим производным отвечают направления, лежащие внутри области, определяемой квантилем направлений на данной станции. Количественный анализ этих областей и степень антикоррелированности этих характеристик производных (интенсивности и направления) позволит собрать указанную информацию на карте, поскольку уже установлено, что важным фактором служит географическая привязка станции или обсерватории.

#### **Список использованных источников**

Gvishiani A., Soloviev A., Krasnoperov R., Lukianova R. (2016), Automated Hardware and Software System for Monitoring the Earth's Magnetic Environment, *Data Science Journal*, Vol. 15, Art. No. 18, doi: 10.5334/dsj-2016-018

Soloviev A., Agayan S., Bogoutdinov Sh. (2016), Estimation of geomagnetic activity using measure of anomalousness, *Annals of Geophysics*, 59(6), G0653, doi: 10.4401/ag-7116

**15. Грант РФФ № 18-17-00241 «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов»**

**Номер госрегистрации: АААА-А18-118091090066-5**

**Руководитель: академик РАН А.Д. Гвишиани**

**Ответственные исполнители: к. ф-м.н. Б.А. Дзебоев, д.т.н. В.И. Кафтан,  
д.т.н. В.Н. Татарин**

**15.1. Актуальность, цель и задачи проекта**

Актуальность исследования обусловлена необходимостью решения важнейшей геоэкологической проблемы России – удаления высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) из среды обитания человека, а также фундаментальностью и междисциплинарным характером научной основы прогноза устойчивости геологической среды на длительные периоды времени в условиях воздействия на породные массивы тектонических напряжений, теплового потока, радиации и других природных и техногенных явлений.

Главный принцип геоэкологической безопасности подземной изоляции РАО – обеспечение сохранности изоляционных свойств пород структурно-тектонического блока (СТБ), вмещающего горные выработки пункта глубинного захоронения РАО, на весь срок радиобиологической опасности РАО, превышающий 10 тыс. лет. Изоляционные свойства СТБ определяются комплексом тектонических, гравитационных и техногенных (выработанное пространство и тепловыделение РАО) полей напряжений, которые в зависимости от прочностных свойств массива горных пород определяют динамику изменения структурной нарушенности. Для описания взаимодействия геологической среды и инженерных объектов широко применяется термин «устойчивость геологической среды».

Под устойчивостью структурно-тектонического блока понимается его способность при природных и техногенных воздействиях сохранять или изменять свои свойства и состояние в таком диапазоне, который не приведет к потере изоляционных свойств пород и выходу радионуклидов за его пределы на весь период радиобиологической опасности радиоактивных отходов.

Цель проекта заключается в:

а) Создании и разработке системного метода прогноза устойчивости структурно-тектонических блоков земной коры на длительные периоды времени.

б) Получении новых знаний о геодинамическом режиме зоны контакта Западно-

Сибирской платформы и Сибирской плиты.

в) Обеспечении геологической безопасности захоронения радиоактивных отходов на участке «Енисейский» Нижнеканского массива (Красноярский край).

Исходя из этого была сформулирована основная задача проекта – **исследование, оценка и прогноз устойчивости СТБ земной коры, подверженных воздействию геодинамических процессов, для обеспечения безопасной подземной изоляции РАО в гранитогнейсовых породах Нижнеканского массива.**

## **15.2. Результаты исследований**

В первый год выполнения проекта был разработан холистический системно-аналитический методологический подход к оценке и прогнозу длительной устойчивости структурных блоков земной коры.

Разработанный оригинальный подход системного анализа детально описывается схемой, представленной на рис. 15.1. Последняя наглядно представляет собой упорядоченную по времени систему пошагового холистического анализа устойчивости структурно-тектонического блока.

Основные результаты исследований, выполненных в 2018 г., следующие.

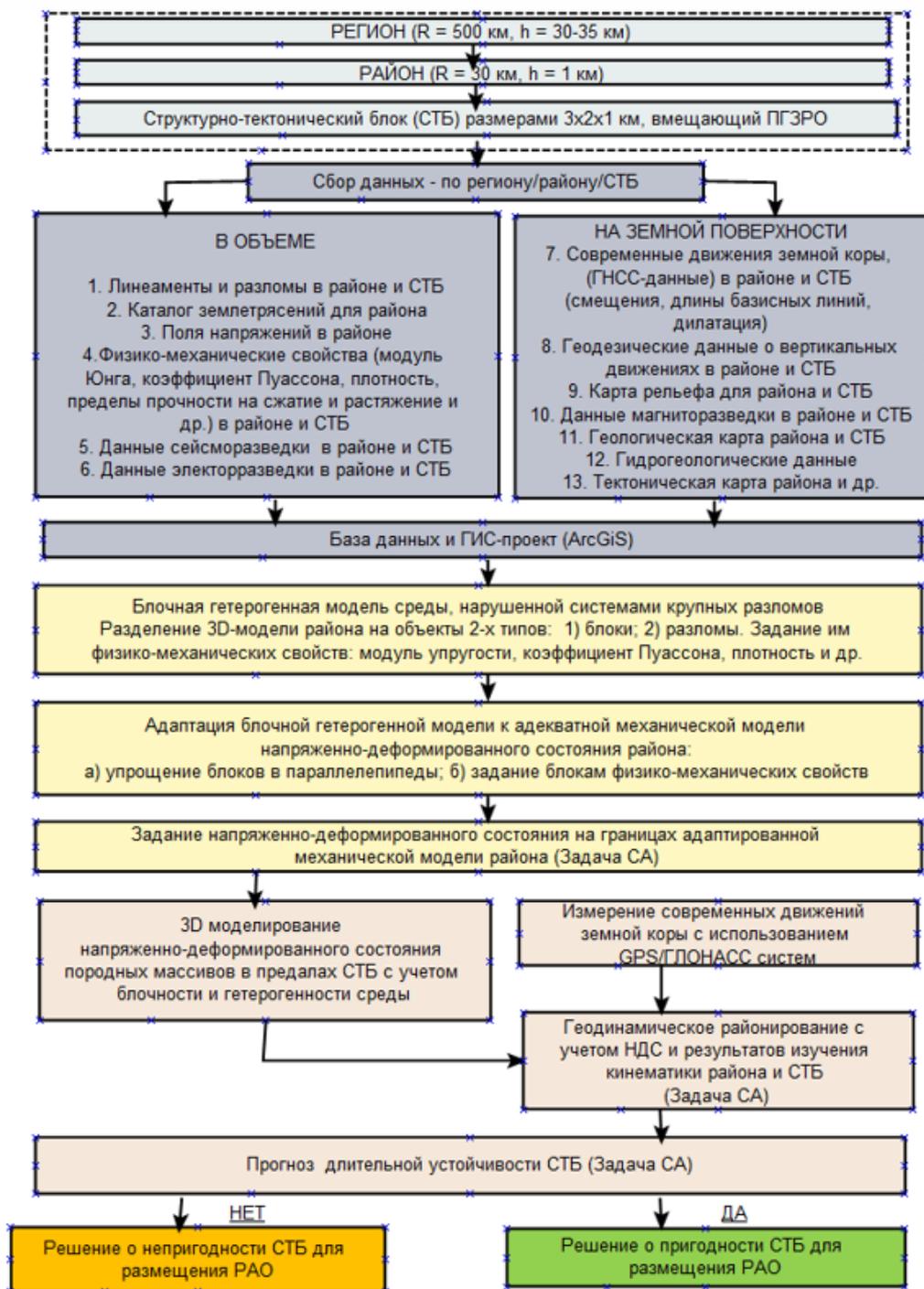
1. Создан системно-аналитический подход к оценке и прогнозу длительной устойчивости СТБ. Он представляет собой упорядоченную по времени систему пошагового холистического анализа устойчивости структурно-тектонического блока, использующие результаты мониторинга, математического моделирования и интерпретации геолого-геофизических данных.

Для опасных горно-геологических явлений и процессов влияющих на устойчивость породных массивов при подземной изоляции РАО, разработаны две классификации:

а) опасные горно-геологические явления и процессы, нарушающие устойчивость СТБ;

б) геологические условия возникновения и активизации опасных ГГЯП.

Классификации представлены в виде таблиц и несут специализированный характер. Они тесно связаны между собой и рассчитаны на совместное использование. Возникновение и активизация ГГЯП определяются комбинацией геологических условий. Каждому конечному типу геологических условий присвоено название, а каждому конечному типу ГГЯП запись типов геологических условий, соответствующих его возникновению.



**Рисунок 15.1 - Схема системного анализа и прогноза устойчивости СТБ на основе холистического подхода**

Выполненный системный анализ опасных горно-геологических явлений и процессов и геологических условий позволяет уточнить и холистически организовать последовательность решения задач этой части исследования:

- Определение и ранжирование по степени необходимости и возможности исследования, опасных горно-геологических явлений и процессов, нарушающих устойчивость СТБ;

- Определение набора, необходимых для этого геологических условий;
- Определение набора данных для исследований в рассматриваемом районе размещения радиоактивных отходов;
- Разработка прогнозов возникновения и активизации опасных ГГЯП и оценка устойчивости СТБ на их основе;
- Определение набора сценариев опасных, внештатных и аварийных ситуаций на исследуемой природно-технической системе (на основе прогнозов).

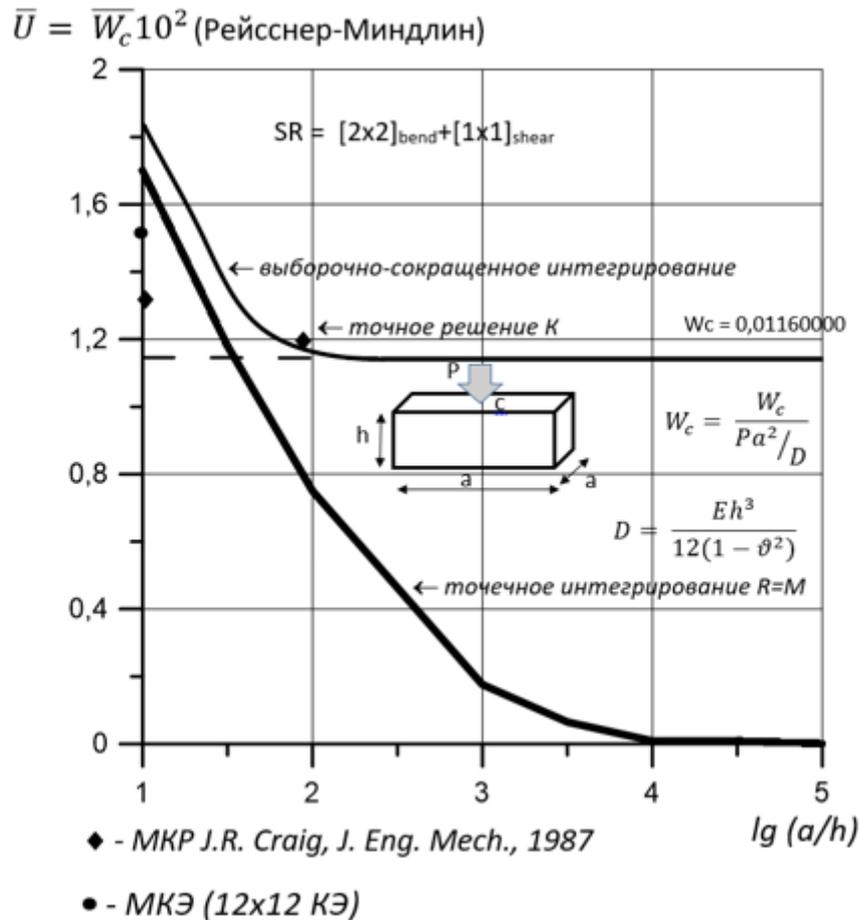
2. Разработан новый оригинальный алгоритм обработки инженерно-геологических данных- «*RaGeP*» (*Rationing of Geological Parameters*), позволяющий выбрать оптимальную комбинацию оценочных значений для процедуры нормирования. Алгоритм *RaGeP* применим к разработанным классификациями опасных горно-геологических явлений и процессов и геологических условий (ГГЯП). Для каждого типа ГГЯП с помощью алгоритма строится поле функции изменчивости состояния среды в структурном блоке, с учетом выбора оптимального метода нормирования данных по представленному алгоритму.

Для практической реализации алгоритма создан программный модуль обработки инженерно-геологической информации, включая данные ГНСС наблюдений. Получено свидетельство на РИД: Программа для ЭВМ № 2018662379 от 11.09.2018 «Программа нормирования шкал значений инженерно-геологических параметров - GP 1.0».

3. Разработан новый алгоритм и программа анализа НДС в структурных тектонических блоках при внешнем силовом действии и энергетических импульсах на основе билинейного конечного элемента и уточненного 8-узлового конечного элемента, свободного от поперечного сдвигового запираания и нулевых энергетических мод.

Получено аналитическое решение задачи изгиба пластины Кирхгофа от действия точечного (мгновенного) энергетического импульса и реализованы эффективные уточненные конечные элементы пластин Рейсснера-Миндлина. Это *a priori* расширяет возможности создаваемого программного обеспечения для расчета напряженно-деформированного состояния структурно-тектонического блока, вмещающего пункт глубинного захоронения РАО;

Сформирован вычислительный конечно-элементный инструментарий для расчета тонких пластин (отношение длины стороны пластины к ее толщине 10–10000) при изгибе. Замена билинейного конечного элемента уточненным 8-узловым конечным элементом позволило повысить точность расчета и улучшить качество геометрического моделирования сложных фрагментов геологической среды (рис. 15.2).

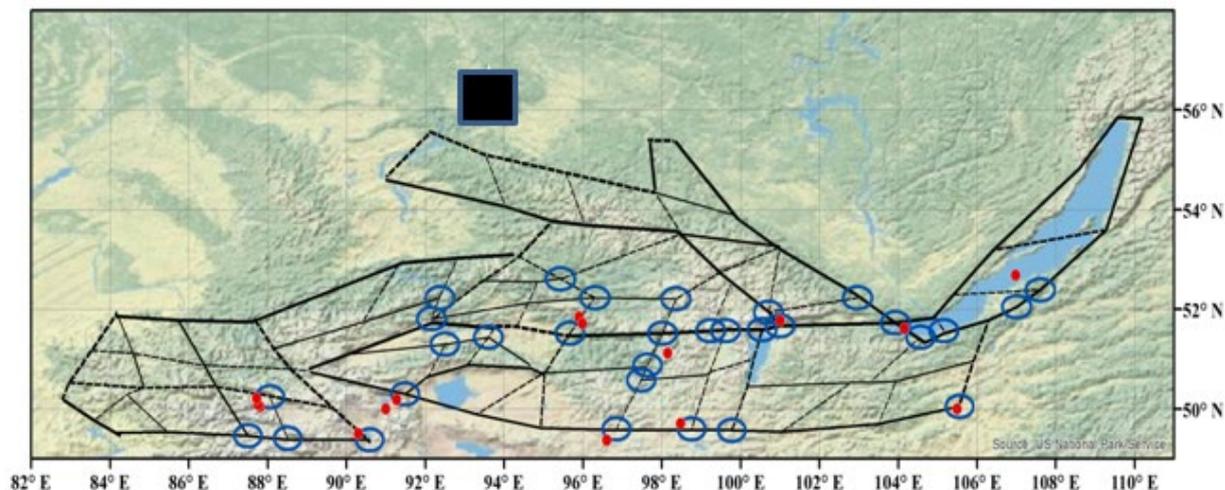


**Рисунок 15.2 – Зависимость безразмерной потенциальной энергии (прогиба)  $\bar{U} = \bar{W}_c 10^2$  для точного интегрирования и выборочно-сокращенного интегрирования в зависимости от отношения длины к толщине пластины на сетке 100 x 100 КЭ. Здесь, ромб соответствует решению из (R.J. Craig, 1987) на конечно-разностной сетке 6 x 6. Пунктирная линия отражает точное решение согласно модели Кирхгофа**

4. На базе инновационного алгоритма распознавания образов, основанного на дискретном математическом анализе, проведено распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье. Результаты распознавания использованы для оценки влияния Алтае-Саянской орогенной области на сейсмическую опасность зоны контакта Западно-Сибирской платформы и Сибирской плиты (рис. 15.3).

Установлено, что места возможного возникновения землетрясения с  $M \geq 6,0$ , приуроченные к узлам пересечения крупных морфоструктурных линейментов Алтае-Саянского орогенного пояса, находятся на расстоянии более 275–300 км от предполагаемого пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов. Использование традиционной формулы связи интенсивности сотрясений  $I$  с магнитудой  $M$  и эпицентральной расстоянием  $R$  землетрясения  $I = 1,5 M - 3,5 \lg R + 3,0$  показало, что для магнитуды  $M = 7,0$ , при удалении от эпицентра на  $R = 250-300$  км можно получить оценку

I не выше 5 баллов.



**Рисунок 15.3 – Схема морфоструктурного районирования региона Алтай-Саяны-Прибайкалье (черные линии), распознанные алгоритмом «Барьер» зоны возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6,0$  (синие круги), эпицентры землетрясений с  $M \geq 6,0$  (красные круги) и место расположения ПГЗРО (черный квадрат).**

Таким образом, возможное силовое воздействие на структурно-тектонический блок, где планируется захоронение РАО, от сильных землетрясений Алтае-Саянской орогенной области существенно ниже сейсмической опасности самого структурно-тектонического блока, указанной на картах ОСР.

5. В рамках геодинамического районирования участка Енисейский Нижнеканского массива выполнено следующее:

- собраны данные по участку Енисейский и прилегающей территории, структурированные по иерархическим уровням в группы, виды и типы: геологическая характеристика участка, результаты геофизических исследований, результаты геодезического изучения территории, результаты моделирования НДС.

- проведен системный анализ данных, выделены данные, необходимые для геодинамического районирования, картографический материал систематизирован, оцифрован и размещен в ArcGIS в базу данных «Системные данные по Нижне-Каснкому массиву».

- построены структурно-тектоническая карта и карта рельефа участка Енисейский в масштабе 1:10 000 для дальнейшего анализа методами ДМА.

- построена карта блокового строения участка Енисейский для последующего моделирования напряженного состояния и прогноза устойчивости СТБ.

- заданы силовые граничные условия для численного моделирования напряженно-деформированного состояния.

6. Выполнена повторная обработка данных ГНСС наблюдений с учетом

разработанной методики улучшения точности определения координат пунктов наблюдений. Основным результатом - вычисленные накопленные значения главных растяжений-сжатий и дилатация (скорость деформаций), за период наблюдений на геодинимическом полигона с 2010 по 2016 г. Разработана методика обработки данных ГНСС-наблюдений, которая включает в себя масштабирование деформаций – приведение их к средней или заданной стандартной площади треугольника. Для этого значения первичных деформаций умножаются на масштабные коэффициенты  $m = P_i / P_m$ , где  $P_i$  – площадь  $i$ -го треугольника,  $P_m$  – средняя (стандартная) площадь треугольника.

Полученные результаты показывают, что в пределах контрольной сети есть области с повышенными значениями растяжений-сжатий, достигающими  $10^{-5}$  в южной части ГДП. Этот участок охватывает зону захоронения радиоактивных отходов, поэтому результаты наблюдений на ГДП должны привлечь внимание при обосновании геоэкологической безопасности захоронения радиоактивных отходов в данном районе. В дальнейшем необходимо также разработать методические подходы к учету масштабных пространственно-временных эффектов при геолого-геофизической интерпретации данных наблюдений на ГДП.

Результаты обработки ГНСС данных будут положены в основу задания граничных условий моделирования напряженно-деформированного состояния горных пород, обнаружения зон опасных деформаций от техногенно-природных воздействий.

7. Проведен эксперимент по тестированию имеющихся ГНСС приемников на эталонном геодезическом базисе Федерального центра геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных Росреестра (рис. 15.4). Точность определения расстояний базиса оценивается средней квадратической ошибкой в 0,3 мм.

Результаты сравнения (табл. 15.1) показали высокую точность измерений. Средняя квадратическая ошибка составила 2,4 мм, при заявленной фирмой производителем ГНСС аппаратуры 3,0 мм для коротких базовых линий длиной менее километра. Средняя разность 0,8 мм не выходит за пределы 30% величины средней квадратической ошибки, что свидетельствует об отсутствии статистически значимой систематической ошибки в измерениях. Результаты эталонирования ГНСС аппаратуры продемонстрировали ее высокую точность и пригодность к прецизионным измерениям на геодинимических полигонах в тектонически слабоактивных регионах.

Таблица 15.1

## Сравнение измеренных горизонтальных проложений с эталонными значениями

Номера центров базиса	Измеренные расстояния (м)	Превышения (м)	Эталонные горизонтальные проложения (м)	Поправки в наклонное расстояние (мм)	Измеренные горизонтальные проложения (м)	Расхождение (мм)
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
1-3	599,796	-2,97	599,7913	-7,3	599,7887	-2,6
3-5	887,221	-1,43	887,2227	-1,2	887,2198	2,9
1-5	1487,018	-4,48	1487,014	-6,8	1487,0112	2,8
2-4	575,329	-2,83	575,3320	-7,0	575,3220	0
Среднее						0,8
<i>СКО</i>						<i>2,4</i>

Обнаруженная деформационная неоднородность в пределах контрольной сети ГНСС и анализ плана геодинимических исследований в районе ПГЗРО на 2019-2021 гг., показали необходимость совершенствования методики и создания программы специальных наблюдений за деформациями земной коры в аномальных зонах, а также методологии геофизической интерпретации данных наблюдений. В частности, это требует развертывания в аномальных зонах более плотной и регулярной сети с большей частотой повторных измерений. Специальная программа наблюдений в этой зоне особо важна, так как последняя расположена вблизи ПГЗРО.



**Рисунок 15.4 - Центры эталонных базисов при эксперименте**

Необходимо продолжение наблюдений в масштабах геодинимического полигона как минимум в течение пяти лет для выявления устойчивого тренда скоростей СДЗК и выявления зон опасных для сохранности изоляционных свойств породного массива деформаций. При этом необходимо обращать внимание и на концентрацию напряжений в других местах геодинимического полигона, где также потребуется совершенствование программы наблюдений.

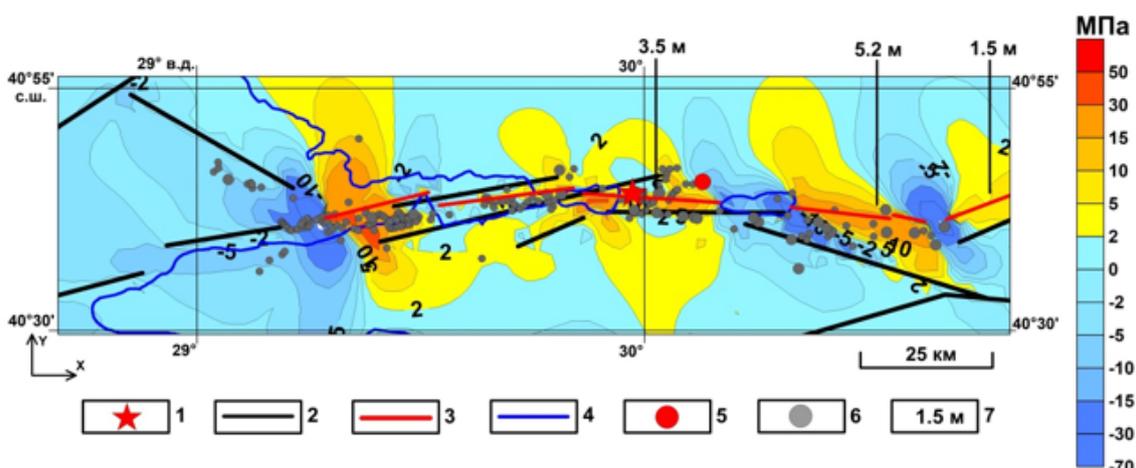
В 2018 году было начато обновление аппаратного парка для проведения полевых наблюдений в рамках проекта РНФ. Был приобретен GNSS-приемник геодезический Дельта-3 N и антенна GA152GNSSA компании *JAVAD GNSS*.

GNSS приемник обеспечивает прием 864 канала, работает от внешнего питания в

диапазоне от +4,5 до +35В и имеет интерфейс управления TriPad (два светодиодных индикатора, кнопка ВКЛ\ВЫКЛ и кнопка функции FN), снабжён встроенной памятью для хранения данных, расширяемой до 16Гб. Точность определения координат при постобработке составляет 3 mm + 0,5 ppm. Антенна GA152GNSSA способна отслеживать сигналы GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou.

8. На базе системного анализа разработана методология оценки и прогноза стабильности СТБ, вмещающего выработки ПГЗРО, основанная на моделировании локальных полей тектонических напряжений, приводящих к возникновению коровых землетрясений, обусловленных концентрацией потенциальной энергии деформации взаимодействующих тектонических разломов. Разлом моделируется протяженной зоной диспергированного материала с упругим модулем на два порядка ниже упругого модуля окружающей геологической среды. Это позволяет выделять области повышенной энергонасыщенности среды до и после сильных коровых землетрясений (т.е. до и после образования разрыва) и рассматривать их как области возможных будущих сильных сейсмических событий (рис. 15.5).

Ввиду отсутствия систематических данных по участку Енисейский был выполнен анализ для района аналога. В результате были получены новые данные о кинематике тектонических процессов в районе Северо-Анатолийского разлома в эпицентральной зоне Измитского землетрясения 1999 г., М 7,4. (координаты эпицентра 40°42' с. ш. 29°59' в. д., глубина очага 13 - 18 км. На примере анализа НДС эпицентральной зоны рассматриваемого землетрясения, показаны основные тектонофизические аспекты, которые необходимо рассмотреть при выборе структурно-тектонического блока для размещения РАО.



**Рисунок 15.5 - Карта разности интенсивности напряжений  $\Delta\sigma_i$  до и после Измитского землетрясения: 1 – эпицентр землетрясения; 2 – тектонические разломы; 3 – положение нового разрыва; 4 – границы водных поверхностей (залив и озера); 5 - сильный афтершок землетрясения, М 6,2; 6 – афтершоки, зарегистрированные в первые 12 часов после землетрясения; 7 – максимальные смещения земной поверхности**

9. Создан оригинальный системно-холистический подход к анализу характеристик структурно-тектонического блока, определяющих его длительную устойчивость. В качестве меры структурной устойчивости структурного блока предложена интегральная динамическая мера активности на основе одного скалярного показателя (мера динамической активности, тождественная мере структурной устойчивости).

Новизна работ в части системного анализа данных геолого-геофизических наблюдений для оценки устойчивости СТБ заключается в использовании оригинального подхода к анализу дискретных данных, созданного в ГЦ РАН школой акад. А.Д. Гвишиани. Главная цель заключалась в разработке методики и алгоритма, которые позволяли бы выработать единую оценку устойчивости СТБ по системе соответствующих признаков устойчивости.

В качестве меры структурной устойчивости СТБ предложена интегральная динамическая мера активности на основе единого скалярного показателя (мера динамической активности тождественна мере структурной устойчивости СТБ).

*Исходные данные:*  $\Omega$  – непрерывная область на плоскости;  $d$  – расстояние в  $\Omega$ ;  $X$  – конечная сетка в  $\Omega$ ;  $F$  – частичный числовой показатель на  $\Omega$ , заданной на конечном подмножестве  $\theta(F) \subset \Omega$ :

$$F : \theta(F) \rightarrow R, \theta(F) = (\theta_1, \dots, \theta_{n(F)})$$

Распространение показателя  $F$  на сетку  $X$ :

$$F(x) = \frac{\sum_{i=1}^{n(F)} F(\theta_i) \prod_{j \neq i} d(x, \theta_j)}{\sum_{i=1}^{n(F)} \prod_{j \neq i} d(x, \theta_j)}$$

Проверка корректности продолжения:

если  $x = \theta_{i^*}$ , то  $\prod_{j \neq i} d(\theta_{i^*}, \theta_j)$  для  $i \neq i^*$ , поэтому

$$\frac{\sum_{i=1}^{n(F)} F(\theta_i) \prod_{j \neq i} d(\theta_{i^*}, \theta_j)}{\sum_{i=1}^{n(F)} \prod_{j \neq i} d(\theta_{i^*}, \theta_j)} = \frac{F(\theta_{i^*}) \prod_{j \neq i^*} d(\theta_{i^*}, \theta_j)}{\prod_{j \neq i^*} d(\theta_{i^*}, \theta_j)} = F(\theta_{i^*})$$

Динамический показатель  $D$  – неотрицательный функционал на  $X$ , параметризованный  $X$

$$D : \Phi(X) \times X \rightarrow R^+,$$

где  $\Phi(X)$  – пространство функций на  $X$ .  $R^+$  – множество неотрицательных

действительных чисел.

Значение  $D(F, x)$  обозначаются через  $D_F(x)$  и понимаются как качественные оценки поведения функции  $F$  в узле  $x \in X$  при подходе  $D$  к её динамике.

Динамические показатели связаны с очень естественными и важными, но самыми простыми точками зрения на динамику функции  $F$ . Общий случай складывается из простых, причём сложение не может быть прямым механическим. Дело в том, что изначально динамические показатели  $D_F$  для разных  $D$  не сравнимы друг с другом и их соединение требует дополнительных усилий в виде мер максимальности или динамической активности показателя  $D_F$ .

Мера динамической активности  $\mu D_F$  является функцией принадлежности на  $X$  к нечёткому понятию «активности функции  $F$  в узле  $x$  с позиции показателя  $D$ ». Мера активности  $\mu D_F(x)$  получается из показателя  $D_F$  с помощью той или иной конструкции меры максимальности *mesmax*, построенной в ДМА:

$$\mu D_F(x) = \text{mesmax}_{D_F(x)} D_F(x)$$

Сложные меры динамической активности как выражение системного взгляда эксперта  $E$  на динамику  $F$ .

Переход  $D_F \rightarrow \mu D_F$  переводит анализ функции  $F$  на язык нечёткой логики и нечёткой математики: меры активности  $\mu D_F$  для разных  $D$  принимают значение в единой шкале отрезка  $[0, 1]$  и могут сочетаться в любых составах и любых количествах с помощью многочисленных операций нечеткой логики и всякого рода усреднений, которые мы обозначим через  $*$ . Становится возможным определить сложную меру  $\mu \mathcal{D}_F$  динамической активности функции  $F$  в узле  $x$  по совокупности показателей  $\mathcal{D}$ :

$$\mu \mathcal{D}_F(x) = *_{D \in \mathcal{D}} (\mu D_F(x))$$

Именно этой конструкцией в общем случае моделируют системный взгляд эксперта  $E$  на динамику функции  $F$ . Во многом такое моделирование является искусством и состоит в подборе базовых динамических показателей  $\mathcal{D}(E)$ , содержательно отражающих системный взгляд эксперта  $E$ , и правильное их соединение  $*(E)$ :

$$\mu \mathcal{E}_F(x) = *(E)_{\mathcal{D} \in \mathcal{D}(E)} (\mu D_F(x))$$

Примеры наиболее важных соединений:

а) Соединения  $*$  с помощью нечеткой конъюнкции  $T$  дают возможность одновременно учесть все базовые динамики из  $\mathfrak{D}(\mathcal{E})$ :

$$\mu_{\mathcal{E}_F}(x) = \uparrow_{D \in \mathfrak{D}(\mathcal{E})} (\mu_{D_F}(x))$$

б) Соединения  $*$  с помощью нечеткой дизъюнкции  $\perp$  дают возможность проявить себя каждой базовой динамике из  $\mathfrak{D}(\mathcal{E})$ :

$$\mu_{\mathcal{E}_F}(x) = \perp_{D \in \mathfrak{D}(\mathcal{E})} (\mu_{D_F}(x))$$

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

$$\mu_{\mathcal{E}_F}(x) = \frac{\sum_{D \in \mathfrak{D}(\mathcal{E})} \omega(D) \mu_{D_F}(x)}{\sum_{D \in \mathfrak{D}(\mathcal{E})} \omega(D)}$$

#### Несколько признаков.

Пусть имеется система признаков  $\mathcal{F} = (F_1, \dots, F_m)$  и  $\mu_{\mathcal{E}_{F_i}}(x)$  меры динамической активности, соответствующие признакам  $F_i$ , тогда общее их соединение даёт меру динамической активности  $\mu_{\mathcal{F}}\mathcal{E}(x)$  для всего набора признаков  $\mathcal{F}$ :

$$\mu_{\mathcal{F}}\mathcal{E}(x) = *(\mathcal{F})_{F_i \in \mathcal{F}} (\mu_{\mathcal{E}_{F_i}}(x))$$

#### Этап кластеризации – выявления областей на сетке.

Мера  $\mu_{\mathcal{E}_F}(x)$  ранжирует узлы  $x$  сетки  $X$ : чем мера узла больше, тем он интереснее. Нам нужны массивные связные скопления (области) на сетке  $X$  интересных узлов. Их мы ищем с помощью алгоритма DPS. Расскажем о нём в общем виде.

Пусть  $\Phi$  – неотрицательная функция на сетке  $X$ ,  $A$  – подмножество в  $X$  и  $x$  – точка в  $X$ . По определению плотность задаётся формулой

$$P_{A,\Phi}(x) = \sum_{y \in D_A(x,r)} \Phi(y),$$

где  $D_A(x,r) = \{y \in A : d(x,y) \leq r\}$  замкнутый шар в  $A$  радиуса  $r_c$  и центром в  $x$ .

Здесь  $r = r_q(X)$  радиус локализации в  $X$ . Он определяется следующим образом: пусть  $d(X)$  множество всех нетривиальных расстояний в  $X$ :

$$d(X) = \{d(x_1, x_2) : x_1, x_2 \in X, \quad d(x_1, x_2) \neq 0\}$$

Радиус локализации  $r$  определяется как степенное среднее при отрицательном показателе  $q < 0$  всех расстояний из  $d(X)$ :

$$r = r_q(X) = \left( \frac{\sum_{d \in d(X)} d^q}{|d(X)|} \right)^{\frac{1}{q}}$$

Здесь, как обычно, через  $|d(X)|$  обозначено количество элементов в множестве  $d(X)$ .

Задачей алгоритма DPS является построение такого множества  $X(\alpha)$ , что его плотность будет не меньше уровня  $\alpha$  ровно во всех его точках.

$$X(\alpha) = \{x \in X : P_{X(\alpha)}(x) \geq \alpha \}$$

Если понимать плотность  $P_A(x)$  как меру предельности точки  $x$  для множества  $A$  и считать все точки с плотностью большей или равной  $\alpha$  предельными для  $A$ , то множество  $X(\alpha)$  будет совпадать с множеством своих предельных точек. В этом смысле  $X(\alpha)$  является аналогом топологического совершенного множества. Отсюда и название алгоритма *Discrete Perfect Sets*.

Вместо ненормированного уровня плотности  $\alpha$  удобно использовать нормированный уровень  $\beta \in (-1, 1)$ . Использование уровня  $\beta$  позволяет при помощи разработанных в рамках ДМА нечётких сравнений сформулировать необходимые требования к плотности результата алгоритма DPS, поэтому результат алгоритма DPS при уровне  $\beta$  обозначается через  $X(\beta)$ . Уровень  $\beta$  и плотность  $P = P(\Phi, r_q)$  однозначно определяет уровень плотности  $\alpha$  и, таким образом  $\alpha = \alpha(\beta, q, \Phi)$ .

## **16. Грант РФФИ № 17-05-01085 «Методы циклостратиграфии в изучении отложений среднего и верхнего миоцена Восточного Паратетиса».**

**Номер госрегистрации: АААА-А17-117040510185-1**

**Руководитель: к.г.-м.н. А.И. Рыбкина**

Изменчивость условий осадконакопления в бассейнах Восточного Паратетиса находятся в тесной взаимосвязи с событийностью развития Средиземноморского бассейна, включая проявление Мессинского кризиса солености. Не смотря на хорошую изученность разновозрастных отложений Восточного Паратетиса и Средиземноморья, вопросы их корреляции все еще остаются дискуссионными. При этом одной из основных проблем является сопоставление большей части региоярусов неогена Восточного Паратетиса с общей стратиграфической шкалой. Использование методов циклостратиграфии, в сочетании с глубоким литологическим изучением отложений, является особенно актуальным для решения существующей проблемы. Особенно важным является выявление возможных перерывов в осадконакоплении, что в свою очередь непосредственно влияет на оценку длительности стратиграфических подразделений и датирование границ.

В данной работе успешно применяется сочетание новейших методов циклостратиграфии, литологических описаний и определения палеомагнитных свойств пород, для комплексной оценки геологических событий, происходивших в средне- и позднемиоценовое время в бассейнах Восточного Паратетиса. Полученные ранее данные и результаты анализа выявленной астрономической цикличности отложений позволили поэтапно проследить события Мессинского кризиса солености (МСК) как на всей территории Средиземноморья, так и провести корреляцию с разрезами Атлантики. При этом, на настоящий момент существуют разные точки зрения о сопоставлении мессиния общей стратиграфической шкалы с региоярусами верхнего миоцена Восточного Паратетиса [Rostovtseva, Rybkina, 2017]. В рамках изучения отложений миоцена Восточного Паратетиса острую дискуссию также вызывает вопрос о положении границы мэотиса и сармата. Так согласно данным [Vasiliev et al., 2011] возраст этой границы составляет 8,2-8,6 млн. лет, что определяет длительность мэотиса в 2,2-2,6 млн. лет соответственно. В то же время, согласно представлениям других исследователей [Trubikhin and Pilipenko, 2011]; [Radionova et al., 2012]; [Popov et al., 2013],

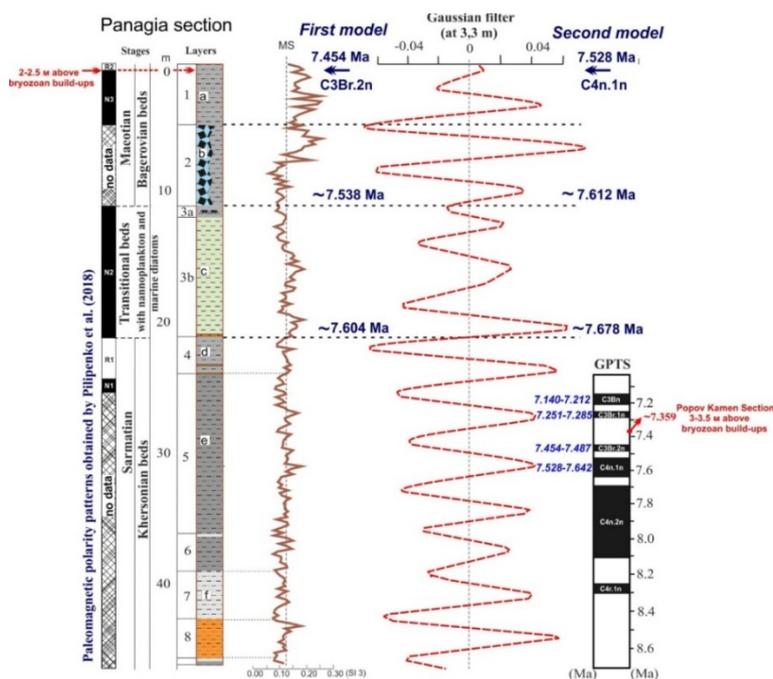
нижняя граница мэотиса проходит на уровне 7,6 млн. лет и соответственно длительность мэотиса оценивается в 1,5 млн. лет.

Для решения этого спорного вопроса, в рамках полевых работ в 2017 г. было проведено опробование переходных сармат-мэотических толщ разреза мыса Панагия (Тамань) палеомагнитными и циклостратиграфическими методами исследования и произведена последующая лабораторная обработка собранного фактического материала в 2018 г. Верхнемиоценовые отложения, вскрываемые на Таманском полуострове, являются уникальным объектом для проведения магнитостратиграфических исследований неогеновых толщ южных регионов Европейской части России. Разрезы Тамани хорошо обнажены и сложены в основном относительно глубоководными глинистыми отложениями, отличающимися от мелководных толщ большей полнотой геологической летописи. В ходе рассматриваемых работ впервые были проведены циклостратиграфические исследования сармат-мэотических переходных слоев разреза мыса Панагия (Тамань), сочетающиеся с петромагнитными и палеомагнитными исследованиями направленными на получение недостающих данных по магнитостратиграфии верхнемиоценовых толщ Восточного Паратетиса.

Согласно методологии проведения циклостратиграфических исследований, были изучены результаты измерения магнитной восприимчивости пород, значения которых варьируются от 0,01 до  $0,24 \times 10^{-3}$  ед. СИ. По результатам построения REDFIT и Lomb-Scargle периодограмм был выявлен устойчивый цикл 3,11-3,49 м, который фиксируется по всему разрезу и вероятно отвечает прецессионным колебаниям. Диаграммы wavelet выявили цикличность в 6 м, что согласуется с данными, ранее полученными по разрезу Попов Камень (Таманский п-ов). Эти циклы в ~3 и ~6 метров отвечают различным периодам астрономической цикличности и отвечают скоростям осадконакопления около ~12 см/тыс. лет, что согласуется с современными представлениями. Это также коррелируется с данными полученными ранее о нижней границе мэотиса 7,6 млн. лет [Trubikhin and Pilipenko, 2011], [Radionova et al., 2012], [Popov et al., 2013], [Rybkina et al., 2015], [Palcu et al., 2018].

Проведено петромагнитное и магнитостратиграфическое исследование отложений верхнего сармата – нижнего мэотиса разреза мыс Панагия Таманского п-ова. Для этих целей были отобраны штуфы (№1-21) из коренных пород изучаемых нижнемэотических и верхнесарматских отложений с интервалом ~1-2 м. Ориентированные по магнитному меридиану штуфы были взяты в основном по напластованию отложений. Число штуфов изученной части разреза мыс Панагия равнялось 21, число образцов 63. Были измерены и исследованы стандартные

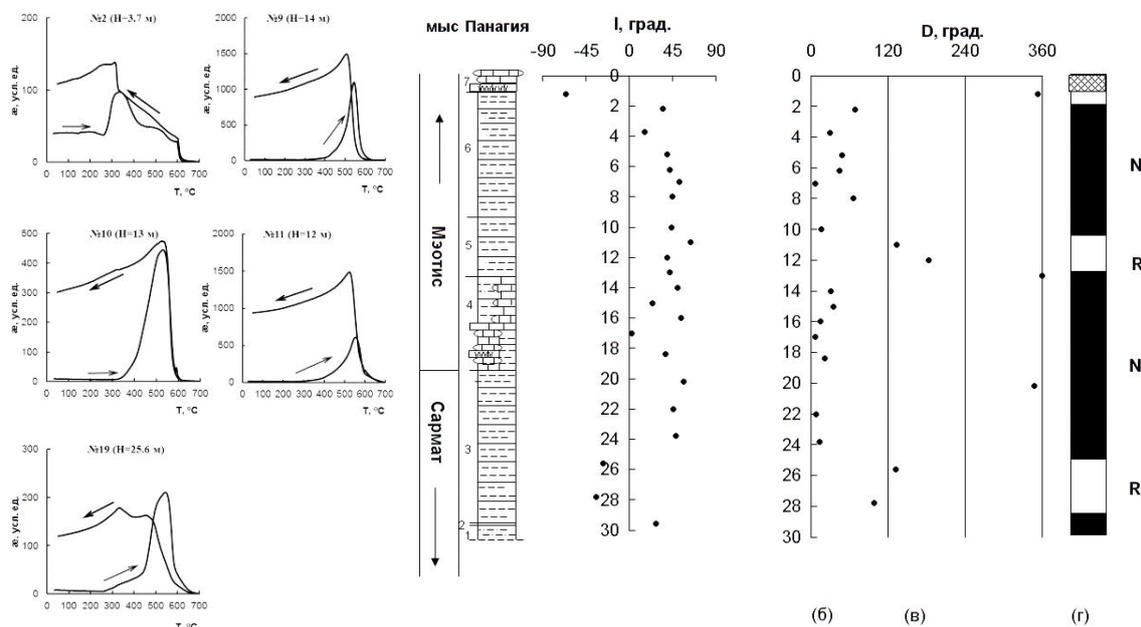
магнитные параметры: естественная остаточная намагниченность  $J_n$ , массовая магнитная восприимчивость  $\chi$  и анизотропия магнитной восприимчивости (AMS). Весь эксперимент проводился в лаборатории «Главного геомагнитного поля и петромагнетизма» Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. Измерения  $J_n$  выполнены на магнитометре JR-6 (AGICO, Чехия),  $\chi$  и AMS – на каппаметре Multi-Function Кappabridge (AGICO, Чехия). Для изучения состава магнитных минералов - носителей намагниченности была отобрана пилотная коллекция, состоящая из 7 порошкообразных проб, на которой был выполнен термомагнитный анализ на каппаметре Multi-Function Кappabridge (AGICO, Чехия) по температурной зависимости магнитной восприимчивости  $\chi(T)$ . Проведенный термомагнитный анализ (рис. 16.2А) по характерному резкому пику на кривых  $\chi(T)$  – так называемому  $\lambda$ -пику [Нагата, 1965] показал, что основным носителем намагниченности является моноклинный пирротин. После нагрева пирротин переходит в магнетит и маггемит о чем свидетельствуют точки Кюри в районе 575–620° С на кривых нагрева и охлаждения и рост магнитной восприимчивости на кривой охлаждения.



**Рисунок 16.1 – Результаты циклостратиграфических исследований переходных сармат мэотических слоев разреза мыс Панагия**

По результатам палеомагнитных исследований, можно сделать вывод, что изученная часть разреза характеризуется чередованием интервалов прямой (N) и обратной полярности (R) (рис 16.2Б). Палеомагнитная характеристика верхнего сармата в наиболее полных разрезах Паратетиса показывает, что в магнитохронологической шкале верхний сармат локализуется в пределах хрона C4 [Cande, Kent, 1992]; [Popov et al., 1996];

[Gradstein et al., 2012]. Отложения, залегающие в кровле верхнего сармата разреза мыс Панагия, намагничены обратно и прямо. Интервал прямой полярности можно сопоставить с хроном C4n. Отложения, слагающие низы нижнего мэотиса, намагничены прямо, обратно и снова прямо, что дает возможность предполагать, что данный интервал отвечает хронам C4n, C3Br и C3Vn.



**Рисунок 16.2 – А - Термомагнитные кривые K(T) цикла нагрев - охлаждение. Литологическая колонка – а. Б - Средние значения наклоения I– б и склонения D – в от мощности разреза Н после чистки переменным полем и применения компонентного анализа. Магнитохронологическая колонка – г: N – прямая полярность магнитного поля, R – обратная полярность магнитного поля**

Возраст границы смены хронов C3 и C4 оценивается по магнитохронологической шкале ~7,3–7,4 млн. лет [Cande, Kent, 1992] и ~7,6 млн. лет [Gradstein et al., 2012]. На границе сарматских и мэотических отложений в разрезе мыса Попов Камень Таманского п-ва предполагается наличие стратиграфического перерыва, обусловившего отсутствие толщ, отвечающих хрому C4n [Пилипенко, Трубихин, 2014]. В результате проведенного исследования в разрезе мыса Панагия выявлены отложения, которые могут быть сопоставлены с частью хрона C4n.

Таким образом, по результатам изучения отложений кровли сармата и низов мэотиса разреза Мыс Панагия Таманского п-ва, а также петромагнитных и палеомагнитных исследований состава ферромагнитной фракции и магнитной анизотропии, можно сделать вывод, что породы в кровле сармата разреза мыс Панагия намагничены прямо и обратно. Породы низов мэотиса намагничены прямо, обратно и снова прямо. Сопоставление с магнитохронологической шкалой ATNTS 2012 показывает, что изученные переходные слои между сарматом и мэотисом, вероятно, отвечают хронам C4n и C3Br. Полученные

результаты согласуются с данными биостратиграфических и радиометрических исследований. Разрез сложен в основном глинами, характеризующимися слабой намагниченностью, носителем которой является моноклинный пирротин.

В рамках полевого сезона 2018 года участниками проекта были проведены экспедиционные работы в Грузии. Работы проводились в период с 30.08.18 по 01.09.18, команда исследователей состояла из 4 человек: Рыбкина Алёна Игоревна (руководитель проекта, ГЦ РАН), Ростовцева Юлиана Валерьевна (Геологический факультет МГУ), Пилипенко Ольга Валентиновна (ИФЗ РАН), Филина Евгения Васильевна (Геологический факультет МГУ). Геологические работы велись вблизи посёлка Уджарма, расположенном в Сагареджойском муниципалитете края Кахетия (рис. 16.3). Район исследований в геологическом плане относится к Мухранско-Тирифонской подзоне Грузинской глыбы.



**Рисунок 16.3 – Панорама изучаемого разреза, скрытого в борту дороги вблизи посёлка Уджарма**

По ходу послойного литологического описания было отобрано 56 образцов для дальнейших микроскопических и рентгеноструктурных исследований и более подробного расчленения разреза. Также был произведен ориентированный отбор тестовых образцов для дальнейших лабораторных палеомагнитных исследований - измерения стандартных магнитных параметров: естественная остаточная намагниченность  $J_n$ , магнитная восприимчивость  $\chi$  и анизотропия магнитной восприимчивости (AMS). При отборе всех палеомагнитных штуфов производились замеры геологическим компасом положения каждого штуфа в пространстве. Количество штуфов изученного разреза составило 9 образцов из отложений конкского региояруса. Измерения магнитной восприимчивости были проведены вдоль всего разреза (вкрест по простиранию слоев) через каждый 0,2 м. В каждой точке было произведено три замера, всего было получено 438 точек измерений и 1314 значений. В рассматриваемых

отложениях магнитная восприимчивость пород изменяется от 0,103 до 0,387 x 10<sup>-3</sup> ед. СИ. Полученные результаты будут детально изучаться в лабораторных условиях в 2019 г.

**Список использованных источников:**

Нагата Т. Магнетизм горных пород. М.: Мир. 1965.

Пилипенко О.В., Трубихин В.М. Петромагнитные и магнитостратиграфические исследования отложений верхнего сармата опорного разреза Попов Камень (Таманский п-ов) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 2. Вып. 24. С.85-94.

Трубихин В.М., Пилипенко О.В. (2011), Петромагнетизм и палеомагнетизм мэотических отложений опорного разреза Попов Камень (Таманский п-ов) // Физика Земли. № 3. С.83-95.

Cande S.C., Kent D.V (1992). A new geomagnetic polarity time scale for the late Cretaceous and Cenozoic // Journ. Geophys. Res.V. 97. I B10. P. 13,917-13,951.

Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M., Ogg G. The Geologic Time scale 2012. Elsevier. 2012. 1176 p.

Popov S.V., Goncharova I.A., Kozyrenko T.F. et al. Neogene stratigraphy and palaeontology of the Kerch and Taman Peninsulas // Excursion guidebook, 1996. 31 p.

Radionova E.P., Golovina L.A., Filippova N.Yu., Trubikhin V.M., Popov S.V. et al.. Middle-Upper Miocene stratigraphy of the Taman Peninsula, Eastern Paratethys // Cent. Eur. J.Geos. 2012. V.4 I. 1. P.188-204. doi: 10.2478/s13533-011-0065-8 .

Rostovtseva Y.V., Rybkina A.I. The messinian event in the Paratethys: astronomical tuning of the black sea Pontian // Marine and petroleum geology. 2017. V. 80. P. 321-332. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2016.12.005.

Rybkina A.I., Kern A.K., Rostovtseva Yu. V. New evidence of the age of the Lower Maeotian substage of the Eastern Paratethys based on astronomical cycles // Geologica Carpatica, 2015. V.330. doi: 10.1016/j.sedgeo.2015.10.003.

Vasiliev I., Iosifidi A.G., Khramov A.N., Krijgsman W., Kuiper K.F., Langereis C.G., Popov V.V., Stoica M., Tomsha V.A., Yudin S.V. Magnetostratigraphy and radio-isotope dating of upper Miocene-lower Pliocene sedimentary successions of the Black Sea Basin (Taman Peninsula, Russia) // Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Paleoacol. 2011. V.310. P. 163-175. doi: 10.1016/j.palaeo.2011.06.022.

Palcu D.V, Vasiliev I., Stoica M., Krijgsman W. The end of the Great Drying of Eurasia: magnetostratigraphic dating of the Maeotian transgression in the Eastern Paratethys // Basin Research V. 31, I. 1, 2018, p. 33-58. doi: 10.1111/bre.12307.

**17. Грант РФФИ № 18-55-05006 «Исследование динамики главного магнитного поля Земли и ионосферной токовой системы Sq с использованием новых методов интеллектуального анализа данных геомагнитных обсерваторий».**

**Номер госрегистрации: АААА-А18-118030290123-2**

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

На сегодняшний день основным методом оценки возмущенности магнитного поля Земли (МПЗ), вызванной магнитной активностью Солнца, остается использование индексов геомагнитной активности. Стоит отметить, что с непрерывным развитием сетей наблюдений в настоящее время Кр-индекс не дает объективной информации об активности в планетарных масштабах. Вместе с тем, на основании значений Кр-индекса Международная ассоциация геомагнетизма и аэрономии (IAGA) каждый месяц выделяет 10 спокойных и 5 возмущенных в магнитном плане дней. Также, в мировой практике отбор данных для построения моделей главного МПЗ (ГМПЗ) часто осуществляется в зависимости от величин Кр-индекса за соответствующие дни (например, в семействе моделей CHAOS [Finlay et al., 2016] и SIFM [Olsen et al., 2015]). В ГЦ РАН был разработан новый способ определения состояния магнитной активности по данным обсерваторских наблюдений при помощи меры аномальности (МА) [Soloviev et al., 2016]. Соответствующий метод базируется на принципах Дискретного математического анализа (ДМА) (напр., [Agayan et al., 2016]) и позволяет оценивать геомагнитную активность с максимальным временным разрешением, соответствующим частоте дискретизации исходного ряда. В работах [Soloviev et al., 2016; Agayan et al., 2016; Gvishiani et al., 2016] рассмотрены приложения меры аномальности в распознавании периодов повышенной геомагнитной активности. Здесь впервые используется дуальное свойство меры для определения суточных интервалов минимальной активности поля, обусловленной внешними источниками, по каждой обсерватории и компоненте в отдельности. Предлагаемый подход позволяет осуществлять распознавание магнито-спокойных дней без существенных задержек, не требуя априорной информации о структуре Sq-вариации и обеспечивая оценку возмущенности в нормированной шкале.

Оценка активности на произвольном временном ряде при помощи МА осуществляется в единой шкале  $[-1, 1]$ . На первом этапе по исходным измерениям, которые определены на интервале (периоде регистрации), вычисляется в скользящем временном окне неотрицательный, заранее определенный функционал, который называется

выпрямлением. Выпрямление можно считать успешно определенным, если аномалии на исходной записи совпадают с локальными экстремумами на выпрямленной записи [Гвишиани и др., 2003]. Здесь и далее мы используем функционал «Длина», суть которого заключается в суммировании абсолютных величин соседних разностей в заданном временном окне, что отражает «изрезанность» того или иного фрагмента исходного временного ряда. Тем самым, выбранный функционал позволяет обнаруживать высокочастотные и/или высокоамплитудные участки, вносящие искажения в плавную изменчивость временного ряда. Следующим шагом является выявление как абсолютно значительных, так и локализованных, но небольших возвышенностей выпрямления. Мы используем нечеткие сравнения [Гвишиани и др., 2003], являющиеся еще одним фундаментальным элементом ДМА, для оценки значимости каждого отдельного значения функции выпрямления относительно ее образа. Результатом является новый временной ряд отображения с областью значений  $[-1, 1]$ , который мы называем МА. Важным свойством МА является та же дискретизация области определения, что и у исходной записи. В работе [Soloviev et al., 2016] эмпирическим путем была разработана шкала значений МА для оценки уровня геомагнитной активности по данным обсерваторий. В рамках настоящей работы нами был предложен новый метод определения наиболее магнито-спокойных дней при помощи МА для заданных месяца, компоненты МПЗ и обсерватории. Магнито-спокойными мы считаем те дни, в которых как можно большее количество измерений имело бы соответствующие значения МА, меньшие 0,4. При выделении магнито-спокойных дней из рассмотрения исключались дни, в течение которых хотя бы одно из значений МА превышало 0,55.

Для дальнейшего ранжирования дней по степени спокойствия нами введен коэффициент спокойствия  $K_D$ , равный количеству минут, за которые  $MA < 0,4$ , деленному на 1440, либо 0, если хотя бы за одну из минут  $MA > 0,55$  (для абсолютно магнито-спокойного дня коэффициент равен 1). Такой коэффициент позволяет для каждого месяца ранжировать выделенные магнито-спокойные дни по убыванию. Нами была также поставлена задача проведения статистических оценок полученных результатов и интегральной оценки геомагнитной активности по всему земному шару для каждого дня. Для этого использовалась комбинация двух критериев: (1) медиана  $M$  ненулевых значений коэффициента  $K_D$ , рассчитанная по всем обсерваториям для заданной компоненты; (2) количество обсерваторий  $P$  с ненулевыми значениями  $K_D$  для заданной компоненты. Для комбинации обоих критериев был введен функционал  $Q$  с весовым коэффициентом  $\beta$ . Поскольку при определении глобально спокойных дней более значимым является второй критерий, по результатам серии тестов  $\beta$  был принят равным 0,9. Кроме того при

построении графика значений  $M$  в порядке убывания  $P$  была получена явно убывающая кривая. Функционал  $Q$  имеет математический смысл расстояния и отражает отклонение от точки с идеальными параметрами  $P=100\%$  и  $M=1$ . Таким образом, чем ближе значение  $Q$  к 1, тем более глобально спокойным является рассматриваемый день. В дальнейшем под магнито-спокойными днями будем подразумевать те дни, для которых определено  $Q$ .

Была рассмотрена представительная выборка обсерваторских данных, как по временному, так и по территориальному охвату. В исследовании использовались данные 48 обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ в диапазоне широт 60ЮШ-60СШ за период 2011.0-2015.5. Высокоширотные обсерватории намеренно не рассматривались, т.к. интенсивные возмущения поля в авроральной зоне могут вносить искажения в интерпретацию результатов апробации метода. Выбор указанного периода обусловлен наличием спутниковых наблюдений, которые использовались при построении моделей ГМПЗ, с которыми впоследствии будет проведено сравнение.

Используя функционал  $Q$  была проведена оценка метода путем сравнения спокойных дней, распознанных при помощи МА, с набором спокойных дней, определяемых IAGA на основе Кр-индекса («IAGA- метод»). Ниже приведем результаты сравнения на данных за 2014 г. Сначала был рассмотрен процент пересечения двух выборок из 5 наиболее спокойных дней, определенных IAGA-методом и предложенным методом в соответствии со значениями  $Q$ , который составил примерно 60%. Аналогично сравнивались две выборки из 10 наиболее спокойных дней. Процент пересечения в этом случае оказался более высоким и составил порядка 80%. Наконец, рассматривались 10 спокойных дней по IAGA-методу и все спокойные дни, для которых было определено значение  $Q$ . Все дни согласно IAGA-методу за исключением двух вошли в множество МА-спокойных дней.

Рассмотрим подробнее дни за 2014 г., которые были объявлены планетарно-спокойными на базе IAGA-метода, но не были выделены как спокойные ни по одной обсерватории при помощи МА. Одним из них было 17 сентября 2014 г. Согласно IAGA-методу, этот день являлся четвертым в рейтинге спокойствия за данный месяц. По магнитограммам целого множества обсерваторий за указанный день наглядно видно, что на протяжении двух достаточно коротких периодов времени на обсерваториях наблюдалась повышенная геомагнитная активность с амплитудой возмущений, сравнимой с амплитудой суточного хода. Вторым днем, не выделенным при помощи предложенного метода, однако, указанным под номером 8 в рейтинге спокойствия по IAGA-методу, стало 23 июня 2014 г. Несмотря на то, что на протяжении практически всего дня поле было абсолютно спокойным, в последние несколько минут присутствовали достаточно сильные возмущения, также сравнимые с магнитудой суточного хода. Значения МА рассчитываются

с той же дискретностью, с которой проводились измерения, что дает возможность изучать тонкую морфологию геомагнитной активности. Очевидно, использование данных за периоды, которые были ошибочно определены как планетарно-спокойные может привести к систематической неверной интерпретации получаемых результатов в исследованиях, связанных с оценкой вклада внешнего магнитного поля, анализом Sq-вариации, изучением быстрых вариаций главного магнитного поля Земли и др.

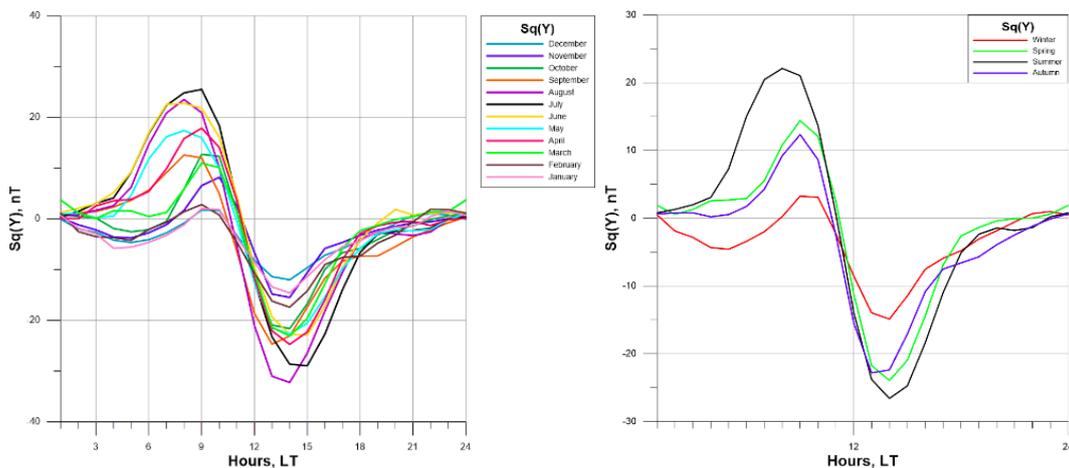
Влияние солнечных вариаций ионосферного происхождения обусловлено наличием вихревых токовых систем в E-слое ионосферы. Они имеют фиксированное относительно Солнца положение и расположены на дневной стороне Земли, в то время как в локально-ночное время (23-02 LT) влияние этих токовых систем минимально (напр., [Yazamaki and Maute, 2017]). Таким образом, данные за магнито-спокойные дни в локально-ночное время в наибольшей степени содержат вклад внутреннего магнитного поля Земли, складываемого из главного поля и литосферного. Такой подход к отбору данных широко применяется при изучении вариаций главного магнитного поля (напр., [Thompson and Lesur, 2007]). Систематическое применение разработанного метода к данным, полученным на 48 обсерваториях за период 2011.0-2015.5, позволило нам построить набор кривых, отражающих временные вариации компонент внутреннего поля. Для этого в каждом месяце за рассматриваемый период определялись наиболее магнито-спокойные дни на каждой обсерватории. По ним, путем поминутного осреднения, рассчитывалась суточная кривая, отражающая по сути среднюю для данного месяца Sq-вариацию на заданной обсерватории. Построение осуществлялось путем нахождения средних значений по каждому временному отсчету по всем выделенным спокойным дням, удовлетворяющим следующим критериям:

1. значение функционала  $Q$  больше 0,98,
2. процент обсерваторий, на которых день выделен как спокойный ( $P$ ), больше 50%.

Для максимального исключения влияния внешних возмущений из полученных данных в дальнейшем нами использовались только данные за локально-ночные часы, с 22:00 до 02:00. Таким образом, вычислив средние значения за указанные 4-часовые промежутки, нами были получены оценочные значения компонент внутреннего магнитного поля для каждой обсерватории с шагом в месяц за весь рассматриваемый временной интервал. Полученные данные легли в основу проведения оценки точности нескольких современных моделей ГМПЗ.

Для создания базы кривых Sq-вариаций рассматривались окончательные 1-минутные данные 75 обсерваторий сети ИНТЕРМАГНЕТ за 2008 год, соответствующий самой низкой солнечной активности за время текущего 24-го солнечного цикла. Выбранные обсерватории охватывают геомагнитные широты от 60ЮШ до 62СШ. Из-за преобладания

эффектов магнитосферных токов и существенных трудностей в извлечении Sq-сигнала на полярных широтах, высокоширотные обсерватории не рассматривались. Для каждой обсерватории временные ряды трех компонент магнитного поля (X, Y и Z) анализировались по местному времени (LT). Sq является регулярной суточной вариацией магнитного поля, связанной с двумя токами, расположенными в области E ионосферы на высотах от 90 до 130 км на дневной стороне в каждом полушарии; токовый вихрь в северном полушарии направлен против часовой стрелки, в южном - по часовой стрелке. Центры обоих вихрей расположены около 30 градусов северной и южной геомагнитной широты соответственно. Для оценки региональных особенностей поля Sq мы выбирали спокойные дни, используя МА для каждой обсерватории индивидуально, не оценивая поле в планетарном масштабе.



**Рисунок 17.1 – Месячные (слева) и сезонные (справа) вариации Sq(Y) на обсерватории CLF в локальном времени в течение 2008 г.**

Чтобы получить близкие к идеалу кривые Sq-вариации с шагом в 1 час за данный месяц («месячная Sq-вариация») по каждой компоненте, мы сначала получаем месячный временной ряд с шагом 1 минута путем усреднения выбранных спокойных дневных магнитограмм по равным UT-минутам, после чего рассчитываем его среднечасовые значения. При оценке амплитуды Sq используется базисное значение согласно [Yamazaki & Maute, 2017]. Часовые отклонения рассчитываются как разности между часовыми значениями компоненты и базисным значением. Т.н. нециклическая вариация определяется как разность между значениями компонент МПЗ за предыдущую и последующую локальную полночь (01 и 24 часа LT). Ее учет достигается путем линейной корректировки часовых отклонений, рассчитанной как разница между значениями за 01-й и 24-й час, деленная на 23. Далее, чтобы получить кривые Sq-вариации с шагом в 1 час в течение заданного сезона («сезонная Sq-вариация») для каждой компоненты, мы выполняем усреднение по одинаковым UT-часам среди рассмотренных месячных кривых Sq-вариации. Рисунок 17.1 демонстрирует месячные и сезонные кривые Sq(Y) для обсерватории CLF

(Шамбон-ла-Форе, Франция), вычисленные по описанной методике. По трем компонентам всех 75 рассматриваемых обсерваторий были рассчитаны массивы месячных и сезонных Sq-вариаций.

### Список литературы

*Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Леденев А.В., Злотники Ж., Боннин Ж.* Математические методы геоинформатики II. Алгоритмы нечеткой логики в задачах выделения аномалий на временных рядах // Кибернетика и системный анализ. 2003. т.39. N4. С.103-111.

*Agayan, S, Bogoutdinov, S, Soloviev, A and Sidorov, R* The study of time series using the DMA methods and geophysical applications // Data Science Journal. 2016. Vol. 15. Pp. 1–21. DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/dsj-2016-016>.

*Finlay, C., Olsen N., Kotsiaros S., Gillet N., Toffner- Clausen L.* Recent geomagnetic secular variation from SWARM and ground observatories as estimated in CHAOS-6 geomagnetic field model // Earth, Planets and Space. 2016. Vol: 68. DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s40623-016-0486-1>

*Gvishiani, A, Soloviev, A, Krasnoperov, R and Lukianova, R.* Automated hardware and software system for monitoring the Earth's magnetic environment // Data Science Journal. 2016. Vol.15. DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/dsj-2016-018>

*Olsen N., Hulot G., Lesur V., Finlay C.C., Beggan C., Chulliat A., Friis-Christensen E., Sabaka T.J., Floberghagen r., Haagmans R., Kotsiaros S., Luhr H., Toffner-Clausen L., Vigneron P.* The Swarm Initial Field Model for the 2014 geomagnetic field // Geophys. Res. Lett., 2015, Vol. 42, doi:10.1002/2014GL062659

*Soloviev A., Agayan S., Bogoutdinov S.,* Estimation of geomagnetic activity using measure of anomalousness // Annals of Geophysics. 2016. Vol. 59 (6). DOI: 10.4401/ag-7116.

*Thompson, A.W.P., Lesur, V.* (2007), An improved geomagnetic data selection algorithm for global geomagnetic field modelling, Geophysical Journal International, Vol. 169(3), p. 951-963, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2007.03354.x>

*Yamazaki, Y. & Maute, A.* 2017, Sq and EEJ - A Review on the Daily Variation of the Geomagnetic Field Caused by Ionospheric Dynamo Currents. Space Sci Rev 206: 299. doi: <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0282-z>

## 18. Международная деятельность ГЦ РАН в 2018 году

В 2018 г. Геофизический центр РАН вел активную международную деятельность в кооперации с зарубежными коллегами и институтами-партнерами. Научный руководитель ГЦ РАН, директор ГЦ РАН (2005–2018 гг.) академик РАН А. Д. Гвишиани был принят в члены Коллегии экспертов Европейского научного фонда (“ESF College of Expert Reviewers”). Деятельность фонда направлена на повышение качества и эффективности научной деятельности в Европе. За 42-летний опыт работы в различных областях исследований фонд поддержал более 2000 программ, собрав более 300000 исследователей из 186 стран мира.

Сотрудники ГЦ РАН входят в состав руководящих органов международных научных организаций. В течение 10 последних лет (2008-2018 гг.) А.Д. Гвишиани был членом Совета IASA, представляющим РАН. ВРИО директора ГЦ РАН, член-корреспондент РАН А.А. Соловьев является вице-председателем Комиссии по данным и информации (UCDI) Международного геодезического и геофизического союза (IUGG) и российским национальным делегатом в Международной ассоциации геомагнетизма и аэронавтики (IAGA) Международного геодезического и геофизического союза (IUGG). Главный научный сотрудник лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований, д.ф.-м.н. Р.Ю. Лукьянова является членом исполнительного комитета (ИК) международной ассоциации геомагнетизма и аэронавтики IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy). Заместитель директора по развитию, к.г.-м.н. А.И. Рыбкина избрана вице-президентом Международного комитета по данным для науки и технологий при Международном совете по науке CODATA (The Committee on Data for Science and Technology ICSU). Специалисты ГЦ РАН ведут исследования в рамках Целевой группы CODATA «Интероперабельность данных о Земле и космосе».

В 2018 г. на базе двух лабораторий ГЦ РАН создается узел данных по обслуживанию российского сегмента международной сети геомагнитных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ. Специалистами ГЦ РАН разработана алгоритмическая система, с применением аппарата нечеткой логики для геомагнитных измерений, которая позволяет получать очищенные от выбросов магнитограммы из предварительных записей практически без участия человека.

Продолжилась работа по совершенствованию магнитных обсерваторий стандарта ИНТЕРМАГНЕТ, поддерживаемых ГЦ РАН. Состоялись командировки сотрудников лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований ГЦ РАН к. ф.-м. н. Р.В. Сидорова и ведущего инженера А.А. Груднева для инспектирования работы магнитной обсерватории "Климовская" (в Архангельской обл.) и магнитной обсерватории на Беломорской биологической станции им. Н.А. Перцова Биологического факультета МГУ

им. М.В. Ломоносова. Было проведено несколько контрольных серий измерений абсолютных значений магнитного поля Земли и проведена работа по улучшению качества данных.

В сентябре 2018 г. заместитель директора по науке ГЦ РАН А.А. Соловьев и заведующий лабораторией геофизических данных к. ф.-м. н Б.А. Дзебоев посетили с рабочим визитом Институт геофизики и инженерной сейсмологии Национальной академии наук Республики Армения (ИГИС НАН РА, г. Гюмри). Главной целью визита было проведение рабочей встречи в рамках реализации российско-армянского гранта РФФИ № 18-55-05006 Арм\_а «Исследование динамики главного магнитного поля Земли и ионосферной токовой системы Sq с использованием новых методов интеллектуального анализа данных геомагнитных обсерваторий». В ходе встречи обсуждались полученные в 2018 г. научные результаты, план работы на 2019 г., подготовка совместных публикаций в международные научные журналы и обсуждение создания совместной геомагнитной обсерватории ГЦ РАН и ИГИС НАН РА.

В 2018 г. Лабораторией геофизических данных ГЦ РАН совместно с [лабораторией электронных публикаций](#) ведется работа по проекту "[База данных по наукам о Земле](#)" — ESDB (Earth Science DataBase), целью которого является создание современной системы регистрации, публикации и цитирования геофизических данных с присвоением цифрового идентификатора объекта DOI (Digital Object Identifier). Главной целью проекта является повышение значимости и доступности геофизических данных для научных исследований, облегчение процесса их поиска, идентификации и публикации, а также развитие культуры цитирования данных.

Важной частью международной деятельности ГЦ РАН является участие сотрудников в международных программах, семинарах, школах среди которых стоит отметить следующие:

- 20 февраля 2018 г. делегация ГЦ РАН, в лице директора ГЦ РАН А.Д. Гвишиани и заместителя директора по науке А.И. Рыбкиной, приняла участие в III Международной конференции «Арктика-2018», которая прошла в Торгово-промышленной палате РФ. А.Д. Гвишиани выступил с докладом «Изучение Арктических территорий совместно с Международным институтом прикладного системного анализа ПАСА (Лаксембург, Австрия)» и принял участие в дискуссии в рамках круглого стола «Международное сотрудничество в Арктике: вызовы и возможности».
- 14 марта в ГЦ РАН состоялся совместный научный семинар Мирового центра данных по физике твердой Земли, Мирового центра данных по солнечно-земной физике

(оба ГЦ РАН), Мирового центра данных по метеорологии и Мирового центра данных по океанографии (оба ВНИИГМИ-МЦД, г. Обнинск). Семинар был посвящен обмену информацией о деятельности Центров и обсуждению направлений дальнейшего сотрудничества российских МЦД в рамках Мировой системы данных (МСД). В результате обсуждения итогов семинара были приняты решения, направленные на повышение эффективности сотрудничества российских МЦД и на усиление роли Российского сегмента в Мировой системе данных.

- 8 июня 2018 г. в ГЦ РАН состоялся научный семинар. Д. ф.-м. н. М.К. Кабан (GFZ, Потсдам, Германия) выступил с докладом: "Структура и эволюция литосферы Северной Америки на основании комплексного моделирования гравитационных и сейсмических данных". Вместе с М.К. Кабаном над исследованием работали Алексей Петрунин, Walter D. Mooney, Magdala Tesauero.

- 23–26 июня 2018 г. директор ГЦ РАН академик А.Д. Гвишиани и заместитель директора по науке ГЦ РАН член-корреспондент РАН А.А. Соловьев принимали участие в 32-й Конференции по математической геофизике (CMG) Международного союза геодезии и геофизики (IUGG). Академик РАН А.Д. Гвишиани выступил с пленарным докладом "Significant, strong and strongest earthquake-prone areas recognition: systems analysis aspects" и докладом "INTERMAGNET for directional drilling in the polar region". Член-корреспондент РАН А.А. Соловьев выступил с приглашенным докладом "Mathematical tools for analysis of ground based and satellite geomagnetic data streams for advanced monitoring of the Earth's magnetic field".

- 6-10 июля 2018 г. старшие научные сотрудники лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований ГЦ РАН Д.В. Перегудов и М.Н. Добровольский приняли участие в объединенном мероприятии – 26-ом Европейском симпозиуме по космическим лучам и 35-ой российской конференции по космическим лучам (26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference). Мероприятие состоялось в Алтайском государственном университете (г. Барнаул, Россия). Были представлены промежуточные результаты выполнения проекта РФФ №17-17-01215 «Создание метода ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки временных рядов матриц наблюдений мюонного годоскопа» (руководитель – А.А. Соловьев):

- 30 июля 2018 г. в Пекине, Китай прошло заседание Рабочей группы Интеграции данных Комитета по данным для науки и технологий (CODATA) "Advancing Interdisciplinary Global Challenges Research Through Data Integration". В

заседании приняла участие заместитель директора по развитию ГЦ РАН к. г.-м. н. А.И. Рыбкина.

- 6-10 августа 2018 г. заведующий лабораторией геофизических данных ГЦ РАН к. ф.-м. н. Б.А. Дзобоев принял участие в X Международной конференции «Мониторинг ядерных испытаний и их последствий», проходившей в г. Алматы, Республика Казахстан. В своих докладах Б.А. Дзобоев доложил о первых результатах по проекту «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов», реализуемому в ГЦ РАН в рамках гранта Российского научного фонда (РНФ).

- С 26 августа по 2 сентября 2018 г. заместитель директора по развитию ГЦ РАН А.И. Рыбкина приняла участие в международной конференции RCMNS "Ecosystem isolation and connection: rise and demise of biota in the Pontocaspian-Caucasian region" и геологической экспедиции по изучению отложений конкского региояруса Восточного Паратетиса. На конференции А.И. Рыбкиной был сделан устный доклад на сессии «Drivers of Miocene transitions» по теме «The Sarmatian-Maeotian transition in Eastern Paratethys», где были изложены основные результаты работ по гранту РФФИ № 17-05-01085 «Методы циклостратиграфии в изучении отложений среднего и верхнего миоцена Восточного Паратетиса».

- 24 октября 2018 г. в Институте географии РАН прошло первое заседание Национального комитета по Международной программе “Future Earth” при Президиуме РАН. В нем принял участие заместитель директора по науке ГЦ РАН член-корреспондент РАН А.А. Соловьев, который является членом комитета.

- 2 ноября 2018 г. ГЦ РАН организовал в Президиуме РАН международный семинар «Системный анализ данных наук о Земле» ("Systems Analysis of the Earth Sciences Data"). Докладчиками семинара стали ученые с мировым именем: профессор Павел Кабат (Нидерланды), научный руководитель Всемирной метеорологической организации (WMO), бывший генеральный директор и научный руководитель Международного института прикладного системного анализа (IIASA, Лаксенбург, Австрия); профессор Миоара Мандеа (Франция), руководитель отдела изучения Земли из космоса Французского космического агентства (CNES), генеральный секретарь Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии (IAGA), бывший генеральный секретарь Европейского Союза Геонаук (EGU), член Европейской академии (Academia Europaea) и Академии наук Румынии (Academia Română); выдающийся российский геохимик, академик РАН, лауреат Государственной премии РФ Э. М. Галимов, научный

руководитель Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН); профессор Дональд Саари, академик-секретарь отделения математики Национальной академии наук США (NAS USA), создатель и бывший директор института математических наук о поведении при Калифорнийском университете (University of California). С докладом «Замечания по теоретическому и прикладному системному анализу» ("Remarks on theoretical and applied systemes analysis") выступил академик РАН А. Д. Гвишиани

- 5–8 ноября в г. Габороне (Ботсвана) прошла Международная неделя данных (International Data Week, IDW), в которой приняла активное участие заместитель директора по развитию ГЦ РАН, вице-президент CODATA к. г.-м. н. А.И. Рыбкина, выступавшая с докладом «Modern tools for data visualization: spherical technologies for Arctic data modeling and scientific analysis» на сессии Visualization and Pattern Recognition Techniques for Understanding Data. В докладе были освещены полученные в ГЦ РАН результаты по разработке демонстрационного контента в области изучения Арктики.

- 7–10 ноября 2018 г. сотрудники ГЦ РАН заведующий лабораторией геофизических данных к. ф.-м. н. Б.А. Дзебоев и ведущий научный сотрудник лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований к. ф.-м. н. Ш.Р. Богоутдинов приняли участие в IV Международной научной конференции молодых ученых «Современные задачи геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства», проходившей в г. Цахкадзор, Республика Армения. В докладах были представлены полученные результаты по проектам «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов» и «Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы», реализуемым в ГЦ РАН в рамках грантов Российского научного фонда (РНФ).

## **19. Отчет о деятельности Национального геофизического комитета РАН в 2018 г.**

Национальный геофизический комитет Российской академии наук (НГК РАН) осуществляет представительство России в Международном геодезическом и геофизическом союзе (IUGG) и его восьми ассоциациях. Основные усилия секций НГК РАН в 2018 г. были направлены на подготовку участия российской делегации в юбилейной 27-й Генеральной ассамблее Международного геодезического и геофизического союза (IUGG), которая состоится 8–18 июля 2019 года в г. Монреале, Канада (<http://www.iugg2019montreal.com/>). Ассамблея будет посвящена 100-летию основания IUGG. В связи с этим знаменательным событием научная программа тематических сессий всех Ассоциаций IUGG будет включать отдельные заседания, посвященные основным научным достижениям за 100 лет существования Союза. По случаю Ассамблеи секции НГК РАН планируют подготовить четырехлетние национальные отчеты с обзором основных результатов работы в 2015–2018 гг.

### **19.1. Секция криосферных наук**

Продолжено изучение ледникового керна, полученного из глубокой скважины Восток в Антарктиде.

Реализована методика реконструкции баланса массы и его составляющих, начиная с середины XIII в. для оледенения архипелага Земля Франца-Иосифа. Показана существенная роль айсбергового стока в формировании кумулятивного баланса наземного оледенения архипелага за длительный период.

Для оценки фронтальной абляции (расхода льда в море) выводных ледников Новой Земли, северной Земли и Земли Франца-Иосифа были использованы: новые данные о толщине льда и подледном рельефе, полученные нами в результате воздушных радиолокационных съёмок 31 ледника на этих архипелагах; данные об изменениях фронтов этих ледников, полученные нами на основе космических изображений; данные о поверхностных скоростях движения ледников, полученные по космическим изображениям и GPS измерениям. В результате установлено, что фронтальная абляция изученных нами ледников составляет: 2,0 км<sup>3</sup>/год на Новой Земле (12 ледников); 1,9 км<sup>3</sup>/год на Земле Франца-Иосифа (11 ледников); 3,2 км<sup>3</sup>/год на Северной Земле (8 ледников).

Исследовано сокращение площади оледенения в горных ледниковых системах России (середина XX – начало XXI века) на фоне изменения летней температуры воздуха и

зимних осадков. Установлено, что региональное сочетание изменений летней температуры приземного воздуха и зимних осадков, определяет разнообразие в поведении ледниковых систем: сокращение площади ледников от 11% на Камчатке до 69% на Корякском нагорье.

Продолжено бурение на Эльбрусе. Во время экспедиции 2018 было пробурено 2 скважины – глубиной 150 и 120 метров.

Исследовано современное состояние и изменения оледенения Камчатки. В целом по Камчатке сокращение оледенения с середины XX по начало XXI века по сравнению с данными Каталога составило  $82,8 \pm 26,9$  км<sup>2</sup> или 10,6%. Площадь оледенения Ичинского вулкана практически не изменилась благодаря мощному моренному покрову, бронирующему языки ледников. В пределах Ключевской группы вулканов, наоборот, наблюдается небольшой рост площади оледенения – 4,3% (8,7 км<sup>2</sup>) с 1950 по 2010–2015 гг. Такая неоднородность динамики оледенения различных районов Камчатки обусловлена разнообразием сочетаний форм макрорельефа, климатических характеристик и наличия (или отсутствия) современной вулканической активности.

Базовая организация по изучению морских льдов – Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (АНИИ). В институте функционирует Мировой центр данных по морскому льду. Институт регулярно организует и проводит научные заседания, посвященные полярным исследованиям и изучению морских льдов. На постоянной основе работает Российская научная арктическая экспедиция на архипелаге Шпицберген. Готовится Межведомственная программа научных исследований и план экспедиционных работ, проводятся работы по техническому обслуживанию и необходимому ремонту приборов, оборудования и транспортных средств.

Проводятся полевые и экспериментальные работы групп океанографии, метеорологии, экологии и мерзлотоведения. Работают гидрологическая и микробиологическая группы, исследуется состояние ледников. В химико-аналитической лаборатории работают атомно-адсорбционный спектрометр и жидкостной хроматограф с масс-спектрометрическим детектором, ведется постановка и валидация методик, разработка методов определения металлов и сложных органических соединений в пробах различных сред. Сотрудники лаборатории участвуют в экспедиционной работе экологической группы, а также в выполнении проекта по определению содержания ПАУ в снежном покрове Баренцбурга.

Деятельность Российской антарктической экспедиции в 2018 г. проводилась на пяти постоянно действующих антарктических станциях – Мирный, Новолазаревская, Беллинсгаузен, Прогресс, Восток, на полевых базах Молодежная, Ленинградская, Русская, Дружная-4 и полевом лагере Оазис. Работа велась составом 63-й зимовочной и сезонной

РАЭ по полному комплексу программ мониторинга природной среды Антарктики. На полевых базах Молодежная, Ленинградская, Русская, Дружная-4 и полевом лагере Оазис работали автоматические метеорологические станции AWS модели MAWS-110 и автоматические геодезические комплексы FAGS.

Проект MOSAiC с общим бюджетом более 60 млн. евро был разработан международным консорциумом ведущих полярных исследовательских институтов под эгидой Международного арктического научного комитета (IASC) под руководством Института Альфреда Вегенера – Центра полярных и морских исследований Гельмгольца (AWI) при участии Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ), Университета Колорадо и Кооперативного института исследований в области наук об окружающей среде (CIRES). Резкие изменения в климатической системе Арктики и быстрое отступление арктического морского льда сильно влияют на глобальный климат. Неспособность современных климатических моделей воспроизводить изменение климата в Арктике является одной из самых насущных проблем в понимании и прогнозировании глобального изменения климата. В результате актуальность круглогодичных наблюдений за ключевыми климатическими процессами в центральной Арктике была подчеркнута всеми основными исследовательскими инициативами, включая IPCC.

В настоящее время, по постановлению правительства ведется подготовка к осуществлению международной дрейфующей научно-исследовательской экспедиции MOSAiC на германском НИЛ «Полярштерн», запланированной на 2019–2020 гг. Многопрофильная дрейфующая обсерватория по изучению климатических изменений климата (MOSAiC) это первая круглогодичной экспедицией в Центральную Арктику, изучающей арктическую климатическую систему.

Базовая организация по изучению широкого спектра проблем от подземных льдов, сезонно- и многолетнемерзлых толщ до криолитозоны криосферы – Институт криосферы Земли СО РАН. Новые научные знания о криогенных процессах и образованиях находят применение не только в практике строительства на мерзлых грунтах, но и в переоценке роли криосферных ресурсов для устойчивого развития регионов. Институт принимает активное участие в организации и проведении Ежегодных международных конференций посвященных криологии Земли в городах Пущино, Тюмень, Салехард, а также стал базовой организацией для издания журнала «Криосфера Земли», что позволило во много раз расширить научное сообщество.

При выполнении фундаментальных программ дается оценка состояния, динамики и устойчивости верхних горизонтов ММП при современных изменениях климата и техногенезе Севера. Изучаются криогенные процессы и их участие в формировании

природно-техногенных субаэральных геосистем российского Севера, определяются тренды эволюции криосферы прибрежно-морской области и шельфа Российской Арктики, изучаются особенности структуры волнового сейсмического поля в верхних горизонтах криосферы в субаэральных и субаквальных условиях. Составляются прогнозно-оценочные сценарии, иерархическая ГИС и компьютерные карты, отражающие современное состояние и изменения основных параметров криолитозоны. Разовые, повторные и режимные наблюдения за геокриологическими параметрами, пополнение ГИС геокриологической и гидрометеорологической информации, в том числе в районах перспективного освоения. Разрабатывается методика краткосрочного прогноза экзогенных геологических процессов для глобального, регионального, локального и элементарного уровней геологической среды и соответствующие ГИС-ориентированные карты процессов для Российской Арктики, Западной Сибири, Карского региона.

В полевых условиях Западной Сибири изучается взаимодействие между компонентами природной среды и техносферы в криолитозоне. Проводится мониторинг, проверяются прогнозные модели поведения криолитозоны и ее элементов, достоверность оценок влияния климата на ее параметры и динамику. Полевые работы продолжают многолетние ряды уникальных наблюдений за динамикой геокриологических условий в естественных и техногенных геосистемах (более 30 лет), за динамикой растительности и ее связи с геокриологическими условиями (37 лет), за температурой многолетнемерзлых пород в скважинах, за термоабразией морских берегов (более 30 лет).

Проводятся экспедиции в район Бованенково (Центральный Ямал), полигоны «Васькины дачи»; район мыса Марре-Сале (Западный Ямал). Здесь ведутся наблюдения за криогенными процессами, динамикой морских берегов, морфологией и геологией шельфовой криолитозоны, мониторинг сезонного протаивания и температурного режима многолетнемерзлых пород на режимных площадках, изучаются базовые геологические разрезы. В районе газопровода Надым–Пунга (Надымский стационар) проводится мониторинг сезонного протаивания и температурного режима многолетнемерзлых пород, изучается динамика растительного покрова в естественных и нарушенных условиях в связи с изменением геокриологических условий.

## **19.2. Секция геомагнетизма и аэрономии**

Члены Секции геомагнетизма и аэрономии назначены конвенерами следующих научных сессий:

- Dependable, long-term geomagnetic indices and modern, index-based services: 70th anniversary of the Kp index (Надежные, долгосрочные геомагнитные индексы и современные сервисы на основе индексов: 70-летие Kp-индекса).
- Significant achievements in magnetic field studies induced by IUGG over its 100-year history (Значимые результаты в исследованиях магнитного поля за 100-летнюю историю IUGG).

Члены Секции чл.-корр. РАН А.А. Соловьев, к.ф.-м.н. Р.И. Красноперов и д.ф.-м.н. А.В. Хохлов приняли участие в ряде экспедиций на Беломорскую биологическую станцию им. Н.А. Перцова Биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (66,5° С.Ш. 33,1° В.Д.). В ходе экспедиций был развернут новый пункт стационарных геомагнитных наблюдений. Это важное событие для научных исследований в области геомагнетизма и солнечно-земной физики, поскольку с каждым годом требуется всё больше и больше информации о магнитном поле нашей планеты и его вариациях. На станции установлен магнитометр POS-4, разработанный в Екатеринбурге конструкторами из Лаборатории квантовой магнитометрии Уральского Федерального Университета, является инновационным устройством.

Данные, регистрируемые на этой обсерватории, будут крайне востребованы российским и мировым научным сообществом, ведущим фундаментальные исследования в области геомагнетизма и солнечно-земного взаимодействия. Регистрируемая на обсерватории информация оперативно передается в Центр геомагнитных данных ГЦ РАН. Данные с магнитной станции доступны на веб-сайте Российско-украинского центра геомагнитных данных при ГЦ РАН (<http://geomag.gcras.ru/>). Созданная обсерватория внесет весомый вклад в исследование эффектов космической погоды, мониторинг магнитного поля Земли, облегчая процедуры его оперативного моделирования. В будущем новая магнитная станция будет расширена до полноценной обсерватории, которая займёт своё место в международной сети геомагнитных наблюдений.

Члены Секции также принимают активное участие в поддержке международного проекта SUPERMAG. ИЗМИРАН представляет Россию в этом проекте, предоставляя цифровые одноминутные данные двух магнитных обсерваторий «Москва» и «Калининград». ИЗМИРАН также поддерживает сеть магнитовариационных станций, данные которых находятся в открытом доступе на сайте ИЗМИРАН: Магнитная обсерватория «Казань»; Научный стационар в Карпогорах; Геофизическая лаборатория БНО; Геофизическая Верхне-Кубанская лаборатория; 4 пункта магнитных наблюдений на Ямале (г. Салехард, г. Надым, остров Белый, мыс Харасавей).

### **19.3. Секция физических наук об океане**

Работа Секции физических наук об океане была сконцентрирована на подготовке участия российских ученых и специалистов в предстоящей ассамблее. Члены секции назначены конвенерами следующих научных сессий:

- Physics and biogeochemistry of semi-enclosed, shelf seas, and coastal zones (Физика и биогеохимия полужакрытых шельфовых морей и прибрежных зон).
- The meridional overturning circulation: mean state and variability (Меридиональный опрокидывающий тираж: среднее состояние и изменчивость)
- Tsunamis (IAPSO, IASPEI, IAVCEI) (Цунами – совместная сессия ассоциаций IAPSO, IASPEI, IAVCEI).