

УДК 512.24

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

**И. И. Чекрыгин, А. А. Фараонов**

Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, 683032,  
г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4

E-mail: [ichekrigin@gmail.com](mailto:ichekrigin@gmail.com), [dervined95@gmail.com](mailto:dervined95@gmail.com)

Данная статья описывает проблему использования параллельных вычислений для корреляционного анализа больших объемов данных.

*Ключевые слова: корреляция, геофизические сигналы, гидрофон, нормальность, нормализация, флюксометр, PyOpenCL, GPU*

© Чекрыгин И. И., Фараонов А. А., 2019

---

MSC 65Y05

## STATISTICAL ANALYSIS OF GEOPHYSICAL SIGNALS WITH THE USE OF PARALLEL CALCULATIONS

**I. I. Chekrygin, A. A. Faraonov**

Vitus Bering Kamchatka State University, 683031, Petropavlovsk-Kamchatsky,  
Pogranichnaya st., 4, Russia

E-mail: [ichekrigin@gmail.com](mailto:ichekrigin@gmail.com), [dervined95@gmail.com](mailto:dervined95@gmail.com)

This article describes the problem of using parallel computing for the correlation analysis of large amounts of data.

*Key words: correlation, VKF, geophysical signals, hydrophone, normality, normalization, fluxmeter, PyOpenCL, GPU.*

© Chekrygin I. I., Faraonov A. A., 2019

## Введение

Различная деятельность человека предполагает работу с данными, такую работу, как: оперирование данными, изучение данных, обработка данных, анализ. Последнее, анализ данных, может понадобиться для нахождения взаимосвязи между различными процессами. Для анализа данных удобно использовать статистические методы, и один из таких методов, это корреляционный анализ. Корреляционный анализ позволяет обнаружить зависимость между несколькими случайными величинами. Размер этих величин может достигаться миллионы значений (а то и в десятки раз больше), тем самым увеличивается продолжительность расчета корреляционного анализа, и для того чтобы ускорить этот процесс один из вариантов – использование параллельных вычислений на графическом процессоре – GPGPU. Цель работы - разработка систем для статистического анализа геофизических сигналов с использованием параллельных вычислений.

## Основные математические методы

Взаимно корреляционная функция (ВКФ, рис. 1) – это метод оценки степени корреляции двух последовательностей.

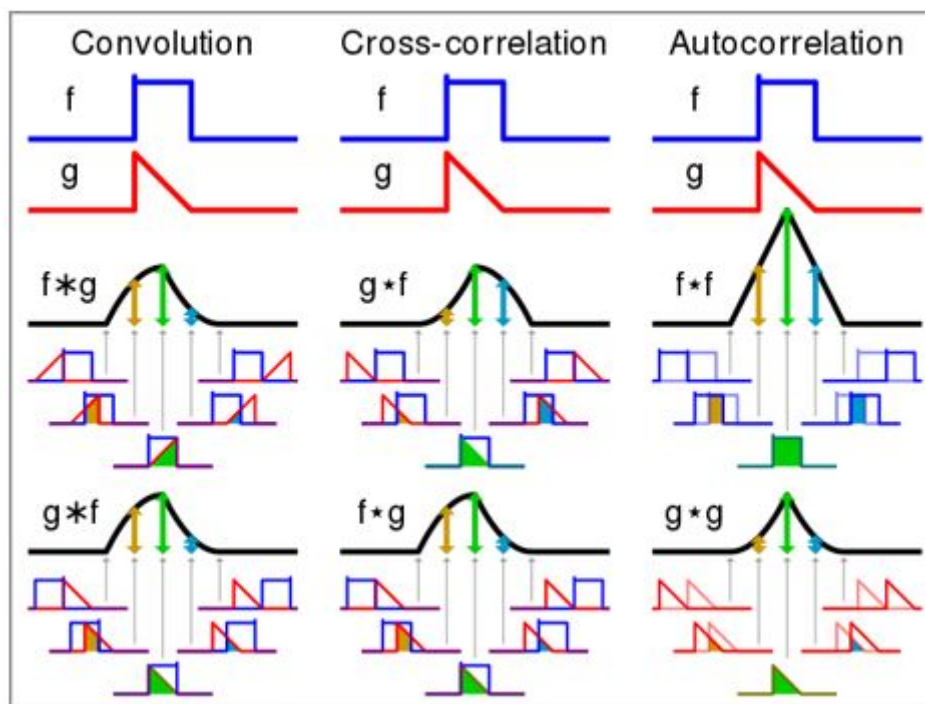


Рис. 1. Слева направо: свёртка, взаимная корреляция и автокорреляция

Корреляция – это статистическая взаимосвязь двух или более величин. При этом изменения значений одной или нескольких из этих величин сопутствуют систематическому изменению значений другой или других величин [1]. Для оценивания ВКФ акустических и электрических полей будет использоваться формула линейного коэффициента корреляции Пирсона:

$$LCC(x, y) = \frac{cov(x, y)}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$  - ковариация.

Ковариация – мера линейной зависимости двух случайных величин.

Таблица 1

### Интерпретация значений коэффициента корреляции Пирсона.

Абсолютное значение (по модулю)	Теснота (сила) корреляционной связи
Менее 0.3	Слабая
От 0.3 до 0.5	Умеренная
От 0.5 до 0.7	Заметная
От 0.7 до 0.9	Высокая
Более 0.9	Весьма высокая

Если значение критерия корреляции Пирсона оказалось больше «1» или меньше «-1» – в расчетах допущена ошибка.

Для того, чтобы выяснить отношение между двумя переменными, часто необходимо избавиться от влияния третьей переменной. Рассмотрим пример 3-х переменных  $x, y, z$ . Исключим влияние переменной  $z$ :

$$r_{\frac{xy}{z}} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (2)$$

- частный коэффициент корреляции.

Для исключения большого числа переменных:

$$r_{\frac{ij}{vars}} = \frac{-R_{ij}}{\sqrt{R_{ij}R_{jj}}}, R_{ij} = (-1)^i + M_{ij}, \quad (3)$$

где  $M_{ij}$  - главный минор матрицы коэффициентов корреляции переменных.

В работе также использованы:

- Критерий Спирмена;
- Критерий Шапиро-Уилка;
- Критерий Колмогорова-Смирнова;
- Нормализация минимаксным методом.

## Выбор программы для анализа статистических данных

Были рассмотрены следующие статистические пакеты:

- StatSoft Statistica;
- Systat;
- Minitab;
- SPSS Statistics;
- Stata.

Перечисленные выше приложения имеют такие минусы, как:

- Низкая скорость расчетов;
- Дороговизна;
- Закрытый исходный код.

Вследствие этого было принято решение разработать собственное программное обеспечение, которое бы соответствовало таким требованиям:

- Кроссплатформенность;
- Высокая скорость расчетов;
- Возможность расширения функционала.

## Парралельные вычисления

Теоретическая производительность GPU значительно превосходит CPU. Ниже представлен график роста производительности CPU и GPU.

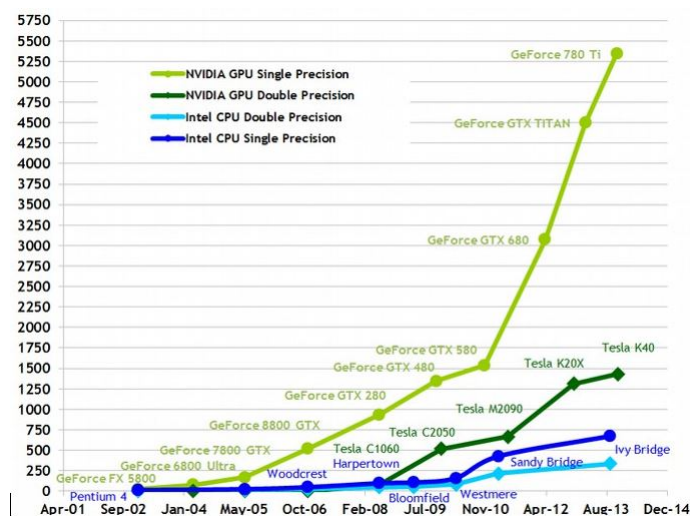


Рис. 2. График роста производительности CPU и GPU

Чтобы понять, какие преимущества приносит перенос расчётов на видеочипы, приведём усреднённые цифры, полученные исследователями по всему миру. При переносе вычислений на GPU, во многих задачах достигается ускорение в 5-30 раз, по сравнению с универсальными процессорами. Самые большие цифры достигаются на коде, который не очень хорошо подходит для расчётов при помощи блоков SSE, но вполне удобен для GPU [2]. Это лишь некоторые примеры ускорений синтетического кода на GPU против SSE-векторизованного кода на CPU (рис. 3).

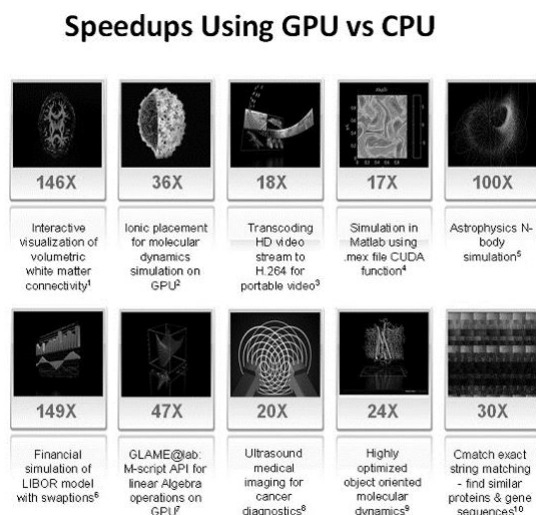


Рис. 3. Прирост скорости при использовании GPGPU

Перечислим основные приложения, в которых сейчас применяются вычисления на GPU:

- 1) Анализ и обработка изображений и сигналов.
- 2) Симуляция физики.
- 3) Вычислительная математика.
- 4) Вычислительная биология.
- 5) Финансовые расчёты.

В данной работе была использована технология openCL. OpenCL (Open Computing Language – открытый язык вычислений) – фреймворк для написания компьютерных программ, связанных с параллельными вычислениями на различных графических и центральных процессорах, а также FPGA. В OpenCL входят язык программирования, который основан на стандарте языка программирования Си C99, и интерфейс программирования приложений. OpenCL обеспечивает параллелизм на уровне инструкций и на уровне данных и является осуществлением техники GPGPU. OpenCL является полностью открытым стандартом, его использование не облагается лицензионными отчислениями. Платформа OpenCL позволяет приложениям использовать хост и одно или несколько OpenCL-устройств как одну гетерогенную параллельную компьютерную систему. Платформа состоит из:

- 1) OpenCL Platform Layer: позволяет хосту обнаруживать OpenCL-устройства.

- 2) OpenCL Runtime: позволяет программе на хосте управлять контекстами.
- 3) Компилятор OpenCL: создает исполняемые файлы, содержащие kernel.

На рис. 4 показана модель OpenCL.

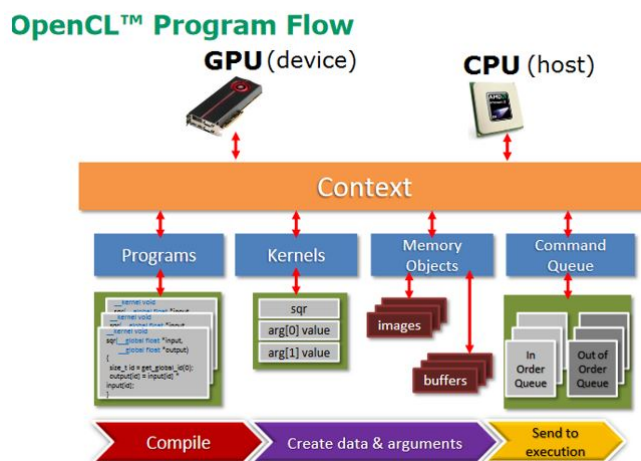


Рис. 4. Модель OpenCL

## Процесс написания программы на OpenCL

Процесс написания программы на OpenCL:

- 1) Создаем контекст для исполнения нашей программы на устройстве.
- 2) Выбираем необходимое устройство (можно сразу выбрать устройство с наибольшим количеством Flops).
- 3) Процесс написания программы на OpenCL.
- 4) Создаем очередь команд на основе ID устройства и контекста.
- 5) Создаем программу на основе исходных кодов и контекста, либо на основе бинарных файлов и контекста.
- 6) Собираем программу (build).
- 7) Создаем kernel.
- 8) Создаем объекты памяти для входных и выходных данных.
- 9) Ставим в очередь команду записи данных из области памяти с данными на хосте в память устройства.
- 10) Ставим в очередь команду исполнения созданного нами kernel.
- 11) Ставим в очередь команду считывания данных из устройства.
- 12) Ждем завершения операций.

## Проектирование и разработка программного обеспечения

При разработке модуля для нахождения взаимно корреляционной функции для работы с OpenCL было принято решение использовать язык программирования Python и библиотеку PyOpenCL, для легкой интеграции в веб-приложение на Django.

При разработке системы статистического анализа геофизических сигналов было решено использовать:

- 1) Python3.
- 2) PyOpenCL.
- 3) Numpy.
- 4) Matplotlib.
- 5) Scipy.
- 6) PyQt5.

Ниже представлены архитектурные особенности обеих систем.

### Система оценки корреляционных связей акустических и электромагнитных сигналов

Так как данная система использует технологию WEB, то она разбита на три части (рис. 5).

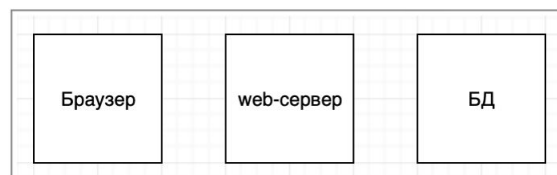


Рис. 5. Взаимно независимые части web-приложения

Взаимодействие с веб-приложением с помощью браузера заключается в таких действиях:

- Выбор данных, отправка запроса на получения количества элементов каждого файла;
- Получение количества элементов выбранных файлов;
- Вывод значений количества элементов выбранных файлов напротив названия файлов; нахождение минимальной длины из двух значений; установка ограничения на элемент указания диапазона первого массива;
- Указание шага, с которым будет проходиться второй массив при расчете ВКФ;
- Нажатие кнопки «выполнить». Отправка на сервер команды выполнения расчета ВКФ;



Рис. 6. Последовательность действий пользователя взаимодействия с веб-приложением

- Получение данных от сервера, расчет ВКФ. Отрисовка графика. Последовательность действий пользователя в браузере показана на рис. 6.

Действия web-сервера при определенных действиях пользователя:

- Расчет количества элементов файла; передача данных пользователю;
- Получение таких данных как: диапазон первого массива; значение шага. Запуск выполнения метода расчета ВКФ;
- После расчета ВКФ данные отправляются пользователю.

Функции сервера показаны на рис. 7.



Рис. 7. Основные функции web-сервера



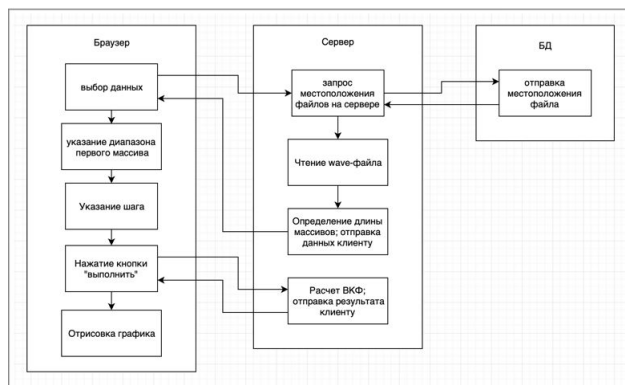


Рис. 8. Взаимодействие браузера, web-сервера и базы данных

Взаимодействие браузера, Web-сервера и БД отображено на рис. 8.

Были проведены тесты на скорость работы функции расчета ВКФ. Тесты проводили над:

- графическим процессором – Radeon Pro 555X;;
- графическим процессором – Intel UHD Graphics 630;
- центральным процессором – Intel Core i7 8th gen;

Результаты тестирования предоставлены на рис. 9.

#### Обычный алгоритм - CPU

```
length_arr1: 5000000
length_arr2: 5000000
Timer: on
Timer: stop; time: 120.269 seconds
```

#### Radeon Pro 555X

```
length_arr1: 5000000
length_arr2: 5000000
Timer: on
Timer: stop; time: 21.731 seconds
```

#### Intel UHD Graphics 630

```
length_arr1: 5000000
length_arr2: 5000000
Timer: on
Timer: stop; time: 37.057 seconds
```

Рис. 9. Результаты тестирования функции расчета ВКФ на скорость работы на графических и центральном процессоре

## Система статистического анализа геофизических сигналов

Исходя из требований к ПО, сначала был спроектирован примерный вид программы (рис. 10).

Было решено поделить систему на два модуля:

- Модуль интерфейса (UI);
- Модуль ядра программы (Kernel).

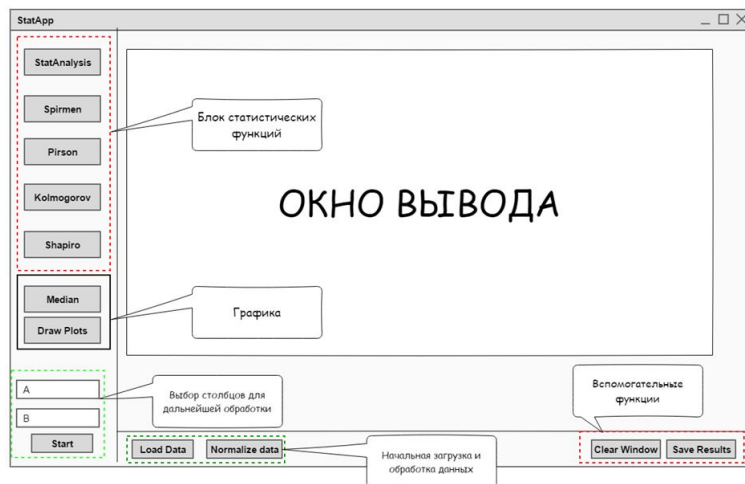


Рис. 10. Спроектированный интерфейс программы

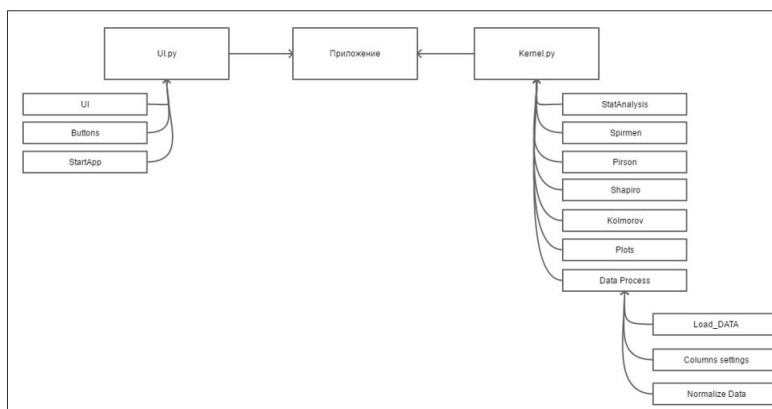


Рис. 11. Структура программы

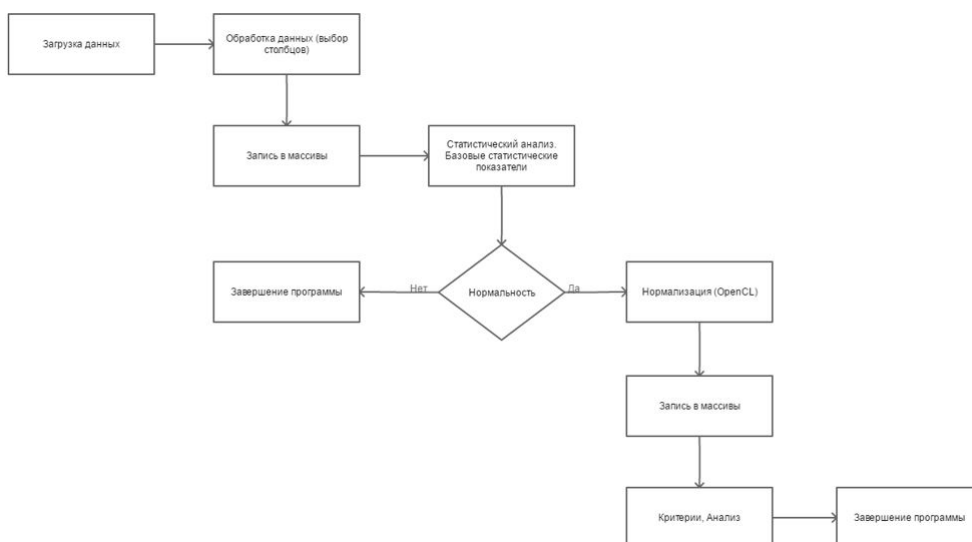


Рис. 12. Алгоритм работы программы с программой

Модуль ядра содержит все функции и методы, которые отвечают непосредственно за функционирование программы. Структура программы показана на рис. 11.

Алгоритм работы с разработанной программой показан на рис. 12.  
Для корректной обработки файлов создано две функции:

- Функция dataProcess (рис. 13);
- Функция reduceData (рис. 14).

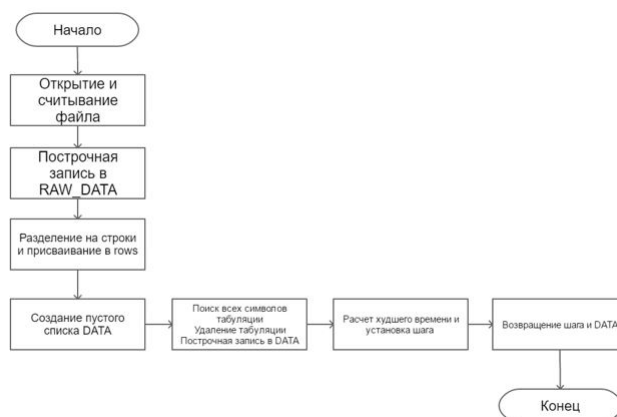


Рис. 13. Алгоритм dataProcess



Рис. 14. Алгоритм reduceData

После тестирования обеих систем, были проведены исследования, результаты которых показаны ниже.

### Исследование данных при помощи системы оценки корреляционных связей акустических и электромагнитных сигналов

ФГБУН Институтом космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН были предоставлены данные:

- Акустической эмиссии – излучения упругих волн, возникающее в процессе перестройки внутренней структуры сред при пластических деформациях. Для регистрации сигналов используются широкополосные пьезокерамические гидрофоны, установленные в естественных и искусственных водоемах. Применение приемников такого типа позволяет, по сравнению со стандартными геологами, расширить частотный диапазон регистрации до 0.1 Гц – 11 кГц. Сбор информации производится в цифровом виде в стандартном формате звуковых данных типа wave [3];
- Электрического поля в земле. Горизонтальные компоненты электрического поля в грунте регистрировались с помощью двух ортогональных измерительных линий длиной 10 м, ориентированных вдоль магнитного меридиана (С-Ю) и перпендикулярно к нему (В-З)[3]. В качестве электродов использовались свинцовые пластины, закопанные на глубину 1 м. Межэлектродное сопротивление линии С-Ю было 10.5, а В-З – 8.7 кОм. Разность потенциалов между электродами подавалась на вход предварительного усилителя с входным сопротивлением 1 Ом. Диапазон регистрируемых частот по уровню 0.7 был 0.1 Гц – 11 кГц[4];
- Электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах.

Найдем Автокорреляцию одного из файла с данными. Возьмем файл с данными электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах. Проведем расчет АКФ при параметрах:

- Диапазон первого массива – [22000000; 22100000];
- Шаг – 10000.

Результаты показаны на рис. 15.

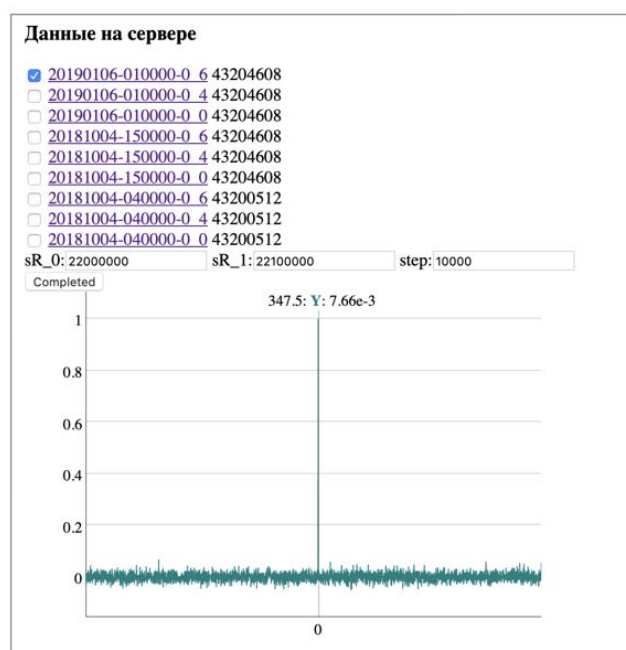


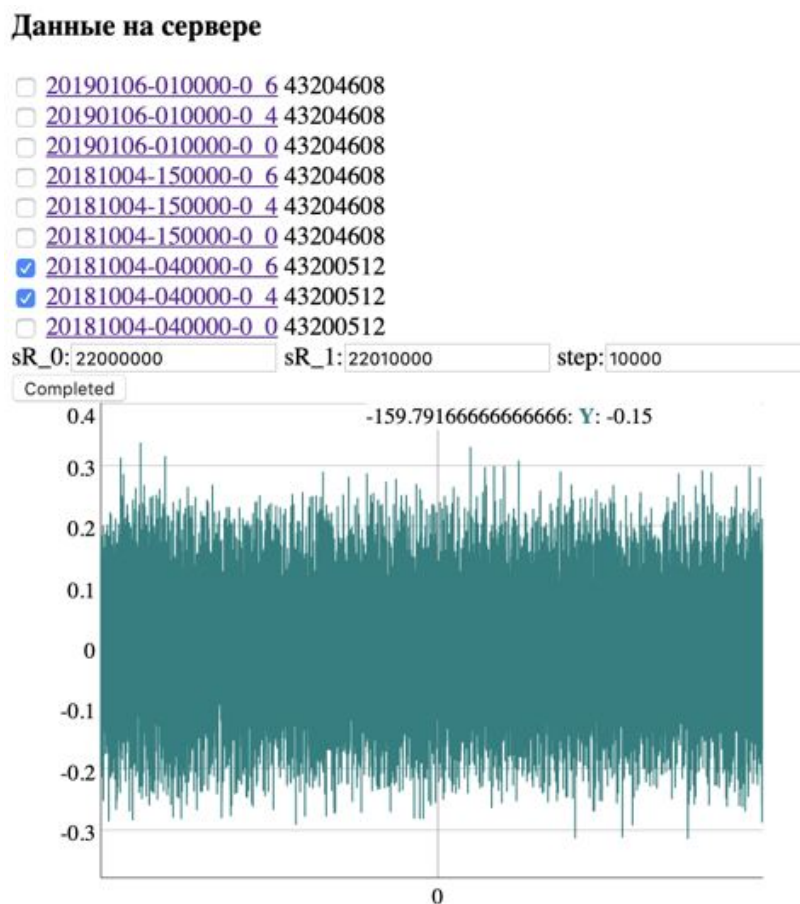
Рис. 15. АКФ электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах, параметры: [22000000; 22100000], 10000

При наведении на точку с высоким коэффициентом корреляции, координаты должны указываться вверху графика, но в данном случае, из-за большого количества точек, равному 175338, координаты нужной точки не отображаются. Для того, чтобы получить координаты увеличим масштаб графика, выделив необходимую область (рис. 15). Значение точки  $[0,1]$  означает, что при отклонении 0 секунд, значение корреляции равно 1, что свидетельствует о наличии абсолютной (функциональной) связи. Выше указанный результат означает, что приложение работает корректно.

Проведем расчет ВКФ между данными: электрического поля в земле и электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах за 04.10.2018, с параметрами:

- Диапазон первого массива:  $[22000000; 22010000]$ ;
- Шаг – 10000.

Результаты показаны на рис. 16.



**Рис. 16.** ВКФ, между данными электрического поля в земле и электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах за 04.10.2018, при параметрах:  $[22000000; 22010000]$

Результаты, которые показаны на рис. 16, говорят о слабой корреляции между двумя массивами данных. Для поднятия точности увеличим длину диапазона первого массива с 10000 (текущее значение) до 100000. Результаты показаны на рис. 17.

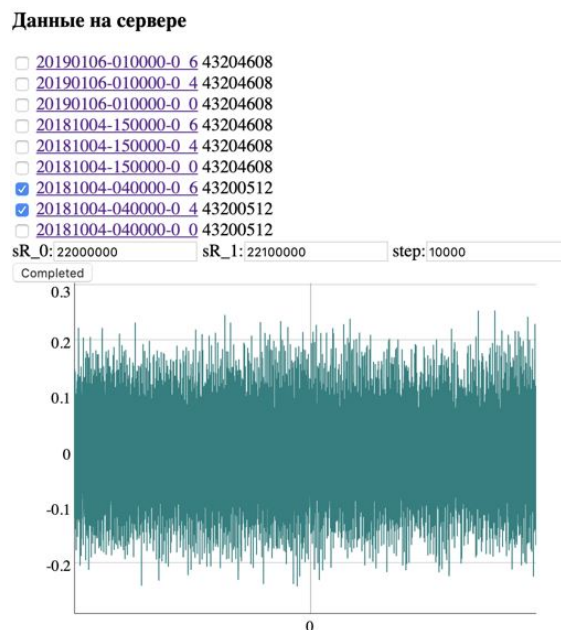


Рис. 17. ВКФ, между «20181004-040000-0-4» и «20181004-040000-0-6»

Наивысшее значение корреляции, в сравнении с предыдущим расчетом ВКФ, упало с 0.34 до 0.25. Повысим точность, увеличив длину диапазона первого массива с 100000 до 1000000. Результаты расчета ВКФ при параметрах: [22000000; 22100000], 1000000, показаны на рис. 18.

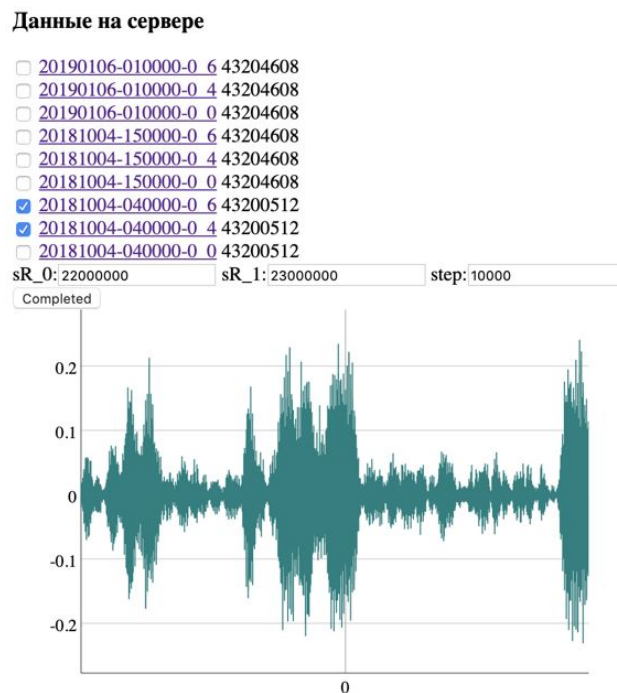


Рис. 18. ВКФ, данными электрического поля в земле и электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах за 04.10.2018, при параметрах: [22000000; 22100000], 1000000

Наивысшее значение корреляции, расчета показанного выше, составляет 0.24, при этом исчезли шумы. Значение коэффициента корреляции – 0.24 – повторяется два раза при  $[-12.291; 0.24]$  и  $[405; 0.24]$ , также можно наблюдать слабую корреляций на координатах  $[-339.375; 0.21]$ ,  $[-96.25; 0.23]$ . Перейдем к анализу данных других датчиков электрического поля в земле и электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах за 04.10.2018. Для начала проведем расчет с параметрами, аналогичными параметрам, которые были взяты выше: Результаты, показанные на рис.

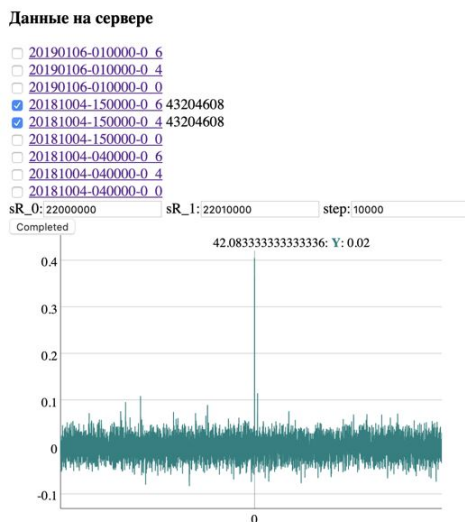


Рис. 19. ВКФ, между данными электрического поля в земле и электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах за 04.10.2018, при параметрах:  $[22000000; 22010000]$ , 10000

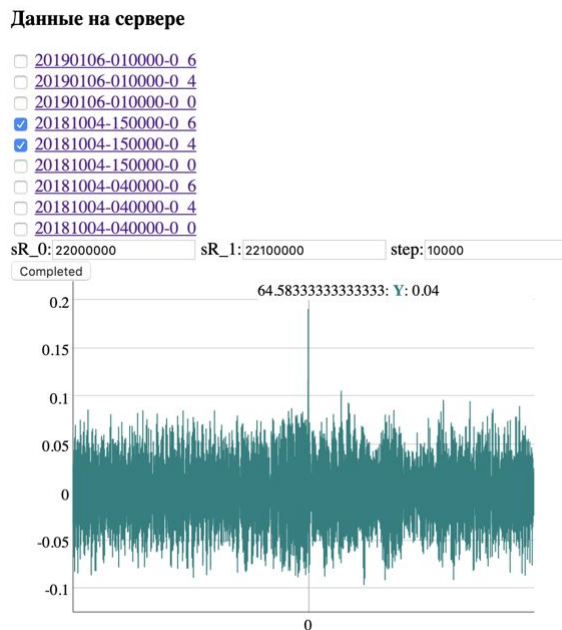


Рис. 20. ВКФ, между данными электрического поля в земле и электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах за 04.10.2018, при параметрах:  $[22000000; 22010000]$ , 10000

19, указывают на корреляцию между данными при координатах  $[0; 0.41]$ . Увеличим длину диапазона первого массива до 100000 (рис. 20).

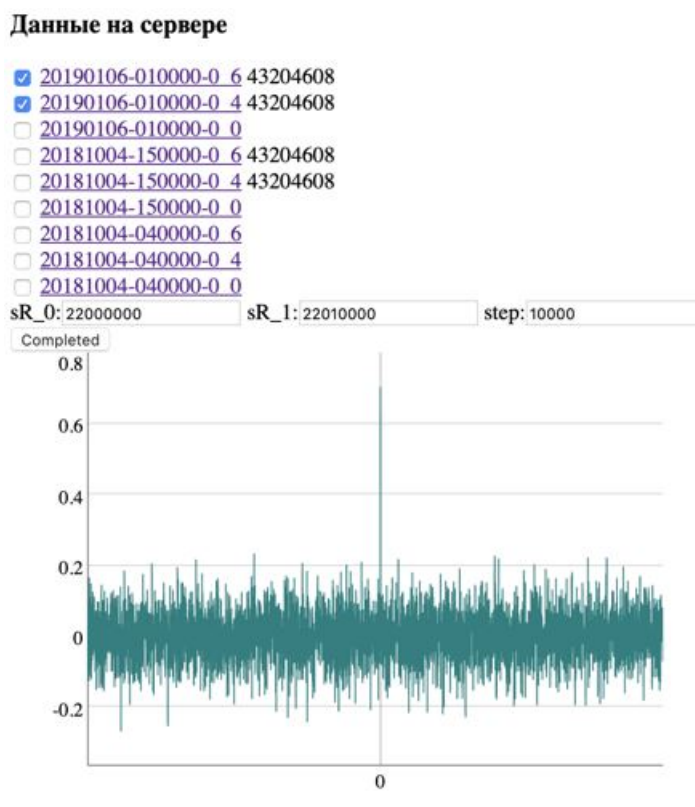
Значение коэффициента корреляции при 0 секунд уменьшилось до 0.19. Найдем наивысший коэффициент корреляции при различных параметрах. Результаты предоставлены в таблице.

Таблица 2

### Наивысший коэффициент корреляции при различных параметрах.

	22009500	22010000	22010500	22012000	22015000
5000	0.38	0.41	0.4	0.39	0.37

Рассмотрим расчет ВКФ между файлами электрического поля в земле и электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах за 06.01.2019, при параметрах  $[22000000; 22010000]$ , 10000. Результаты показаны на рис. 20. При увеличении масштаба графика, значение коэффициента корреляции равно 0.7 (рис. 21).



**Рис. 21.** ВКФ, между файлами электрического поля в земле и электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах за 06.01.2019, при параметрах:  $[22000000; 22010000]$ , 10000

Данное значение означает, что данные из файлов имеют высокую силу (тесноту) корреляционной связи. На всем диапазоне графика также видно слабую силу корреляционной связи, менее 0.3.

Наивысший коэффициент корреляции, показанный на рисунке выше, имеет значение 0.76 при 0 сек. Результаты исследования, проведенного выше, между файлами



электрического поля в земле и электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах, говорят о том, что между ними присутствует какая-либо корреляционная связь. Наивысший показатель корреляционной связи был установлен между файлами за 06.01.2019 с параметрами [22000000; 22100000], 10000, и равен 0.76. Самые низкие значения коэффициента корреляции (слабая корреляция) от 0.2 до 0.24, можно было наблюдать между файлами за 04.10.2018, при параметрах: [22000000; 22100000], 10000000.

После проведенного исследования можно говорить о том, что корреляция между предоставленными данными электрического поля в земле и акустической эмиссии отсутствует. Сравнение предоставленных данных говорит о том, что:

- между данными электрического поля в земле и акустической эмиссии корреляционная связь отсутствует;
- между данными электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах и акустической эмиссии корреляционная связь отсутствует;
- между данными электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах и акустической эмиссии корреляционная связь отсутствует;
- между данными электрического поля в земле и электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах корреляционная связь в каком-либо виде присутствует и чаще всего данная связь имеет умеренную тесноту (силу) и выше.

## **Исследование на наличие корреляции между данными с гидрофона и флюксометров при помощи системы статистического анализа**

В период с 27.06.2006 по 16.10.2006 года Институтом космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН проводились исследования акустической эмиссии пород, вертикальный градиент потенциала  $V'$  электрического поля в приземном воздухе, атмосферное давление, осадки и скорость ветра [6]. Для измерения данных показателей были использованы четыре гидрофона, которые были ориентированы по сторонам. Данные гидрофоны были установлены на дне озера Микижа глубиной 4 метра. С выходов гидрофонов сигналы в диапазоне частот 0.1-10000 Гц усиливались, фильтровались по частотам 0.1-10, 10-50, 50-200, 200-700, 700-1500, 1500-6000, 6000-10000 Гц, подавались на амплитудные детекторы, накапливались за 4 с, оцифровывались и регистрировались в компьютере. Данные, измеренные гидрофоном – это файлы с расширением «int», где строки 2,3,4,5,6,7,8 – это данные, отфильтрованные по частотам, описанным выше.

Для более детальных исследований, одновременно с замерами при помощи гидрофонов, было задействовано два электростатических флюксометра. Один был установлен вблизи озера Микижа на поверхности в 130 метрах от гидрофонов, второй на удалении 2.7 м от первого на высоте 1.3 м. Для совместного анализа данных использовался гидрофон восточного направления, ориентированный на флюксометр. Данные, записанные первым флюксометром это столбцы 5 и 6 в файле типа «703», а столбцы 7,8 – это данные второго электростатического флюксометра [6].

После анализа всех возможных комбинаций данных, было выявлено, что у некоторых показаний есть корреляция. Рассмотрим самые примечательные ниже. Четвертый и шестой столбцы, за 22 августа (первый канал) показали корреляцию по

Пирсону в размере  $-0.2615914985830499$ . График и результаты показаны ниже (рис. 22).

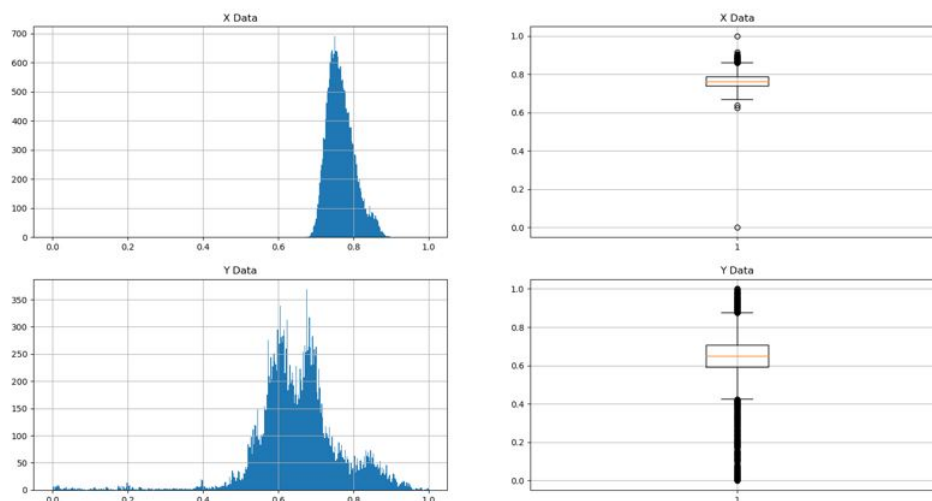


Рис. 22. Визуальное представление данных первого канала гидрофона (200-700 Гц) и первого флюксметра за 22 августа 2006 года

Сводная таблица корреляций гидрофона(200-700 Гц) и первого флюксметра (6 столбец) показаны ниже.

Таблица 3

**Сводная таблица корреляций гидрофона (200-700 Гц) и первого флюксметра (6 столбец).**

Канал	22 августа	23 августа	11 сентября
0	-0.13(Спирмен)	0.09(Спирмен)	0.4(Спирмен)
0	-0.03(Пирсон)	0.05(Пирсон)	0.12(Пирсон)
1	-0.26(Пирсон)	0.086(Пирсон)	0.18(Пирсон)
1	-0.33(Спирмен)	0.04(Спирмен)	-0.02(Спирмен)

Аналогично составим таблицу для данных с гидрофона (200-700 Гц) и второго флюксметра.

Таблица 4

**Сводная таблица корреляций гидрофона(200-700 Гц) и второго флюксметра (7 столбец).**

Канал	22 августа	23 августа	11 сентября
0	-0.03(Спирмен)	0.07(Спирмен)	0.11(Спирмен)
0	-0.12(Пирсон)	0.11(Пирсон)	0.08(Пирсон)
1	-0.26(Пирсон)	0.08(Пирсон)	0.18(Пирсон)
1	-0.31(Спирмен)	0.05(Спирмен)	-0.027(Спирмен)

Из табл. 3 и 4 видно, что показания между собой практически не отличаются. Это обусловлено тем, что разница между двумя флюксметрами только в высоте их расположения.

Рассмотрим данные первого канала гидрофона (700-1500 Гц) и первого флюксметра (табл. 5-7).

Таблица 5

**Сводная таблица корреляций гидрофона (700-1500 Гц) и первого флюксметра (6 столбец).**

Канал	22 августа	23 августа	11 сентября
0	-0.05(Пирсон)	0.07(Пирсон)	-0.14(Пирсон)
0	-0.12(Спирмен)	-0.03(Спирмен)	-0.036(Спирмен)
1	-0.36(Пирсон)	0.26(Пирсон)	0.18(Пирсон)
1	-0.515(Спирмен)	0.22(Спирмен)	0.039(Спирмен)

Кроме того, была замечена корреляция гидрофона (6000-10000 Гц) со вторым флюксметром. Остальные представляющие интерес результаты показаны ниже.

Таблица 6

**Сводная таблица корреляций гидрофона (6000 – 10000 Гц) и второго флюксметра (7 столбец).**

Канал	22 августа	23 августа	11 сентября
0	-0.11(Спирмен)	-0.45(Спирмен)	-0.03(Спирмен)
1	-0.12(Спирмен)	-0.43(Спирмен)	0.006(Спирмен)

Таблица 7

**Сводная таблица корреляций гидрофона (1500-6000 Гц) второго флюксметра (7 столбец).**

Канал	22 августа	23 августа	11 сентября
0	-0.17(Спирмен)	-0.27(Спирмен)	-0.09(Спирмен)
1	-0.19(Спирмен)	-0.013(Спирмен)	0.004(Спирмен)

## Заключение

В ходе выполнения данной работы выполнены следующие задачи:

- спроектировано и разработано веб-приложение;
- разработано ядро системы корреляционного анализа;
- проведено исследование между данными электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах, электрического поля в земле и данными акустической эмиссии;
- выявлено, что корреляционная связь присутствует только между данными электрического поля в земле и электромагнитного излучения атмосферы в ОНЧ диапазонах;
- была спроектирована и разработана система статистического анализа геофизических сигналов с использованием технологии параллельных вычислений OpenCL;
- проведено исследование на наличие корреляции между данными с гидрофонов и электростатическими флюксометрами.

Данные, в которых выявлена связь можно в дальнейшем исследовать более детально в других программных продуктах.

## Список литературы/References

- [1] Кремер Н. Ш., *Теория вероятностей и математическая статистика*, Учебник для студентов вузов, обучающихся по экономическим специальностям, ЮНИТИ-ДАНА, 2010, 551 с. [Kremer N. Sh., *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika*, Uchebnik dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po ekonomicheskim spetsial'nostyam, YUNITI-DANA, 2010, 551 pp.]
- [2] Запрыгаев С. А., Карпушин А. А., “Применение графического процессора в ресурсоемких вычислениях на базе библиотеки OpenCL”, *Вестник ВГУ*, **2** (2010), 79–87. [Zapryagayev S. A., Karpushin A. A., “Primeneniye graficheskogo protsessora v resursoyemkiy vychisleniyakh na baze biblioteki OpenCL”, *Vestnik VGU*, **2** (2010), 79–87].
- [3] Муратов П. В., Руленко О. П., Марапулец Ю. В., Солодчук А. А., “Электрический и акустический отклик приповерхностных осадочных пород на прохождение сейсмических волн от землетрясений”, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2018, № 5(25), 52–63. [Muratov P. V., Rulenko O. P., Marapulets YU. V., Solodchuk A. A., “Elektricheskiy i akusticheskiy otklik pripoverkhnostnykh osadochnykh porod na prokhozhdeniye seysmicheskikh voln ot zemletryaseniyy”, *Vestnik KRAUNTS. Fiz.-mat. nauki*, 2018, № 5(25), 52–63].
- [4] Марапулец Ю. В., Шевцов Б. М., Ларионов И. А., “Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений”, *Тихоокеанская геология*, 2012, № 6, 59–67. [Marapulets YU. V., Shevtsov B. M., Larionov I. A., “Otklik geoakusticheskoy emissii na aktivizatsiyu deformatsionnykh protsessov pri podgotovke zemletryaseniyy”, *Tikhookeanskaya geologiya*, 2012, № 6, 59–67].
- [5] Третьяк Л. Н., *Обработка результатов наблюдений*, Учебное пособие, ГОУ ОГУ, 2004, 171 с. [Tret'yak L. N., *Obrabotka rezul'tatov nablyudeniyy*, Uchebnoye posobiye, GOU OGU, 2004, 171 pp.]
- [6] Марапулец Ю. В., Руленко О. П., Мищенко М. А., *Синхронные возмущения акустической эмиссии пород и электрического поля в приземном воздухе на пункте «Микижа»*, № 06-I- П16-070, ДВО РАН. [Marapulets YU. V., Rulenko O. P., Mishchenko M. A., *Sinkhronnyye vozmushcheniya akusticheskoy emissii porod i elektricheskogo polya v prizemnom vozdukhke na punkte «Mikizha»*, № 06-I- P16-070, DVO RAN].

## Список литературы (ГОСТ)

- [1] Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. Учебник для студентов вузов, обучающихся по экономическим специальностям: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. 551 с.
- [2] Запрягаев С. А., Карпушин А. А. Применение графического процессора в ресурсоемкий вычислениях на базе библиотеки OpenCL // Вестник ВГУ. 2010. №2. С. 79–87.
- [3] Муратов П. В., Руленко О. П., Марапулец Ю. В., Солодчук А. А. Электрический и акустический отклик приповерхностных осадочных пород на прохождение сейсмических волн от землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. №5(25). С. 52–63.
- [4] Марапулец Ю. В., Шевцов Б. М., Ларионов И. А. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений // Тихоокеанская геология. 2012. №6. С. 59–67.
- [5] Третьяк Л. Н. Обработка результатов наблюдений. Учебное пособие: ГОУ ОГУ, 2004. 171 с.
- [6] Марапулец Ю. В., Руленко О. П., Мищенко М. А. Синхронные возмущения акустической эмиссии пород и электрического поля в приземном воздухе на пункте «Микижа». № 06-И-П16-070. ДВО РАН

**Для цитирования:** Чекыгин И. И., Фараонов А. А. Статистический анализ геофизических сигналов с использованием параллельных вычислений // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2019. Т. 27. № 2. С. 74-94. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-27-2-74-94

**For citation:** Chekrygin I. I., Faraonov A. A. Statistical analysis of geophysical signals with the use of parallel calculations, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2019, **27**: 2, 74-94. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-27-2-74-94

Поступила в редакцию / Original article submitted: 05.06.2019