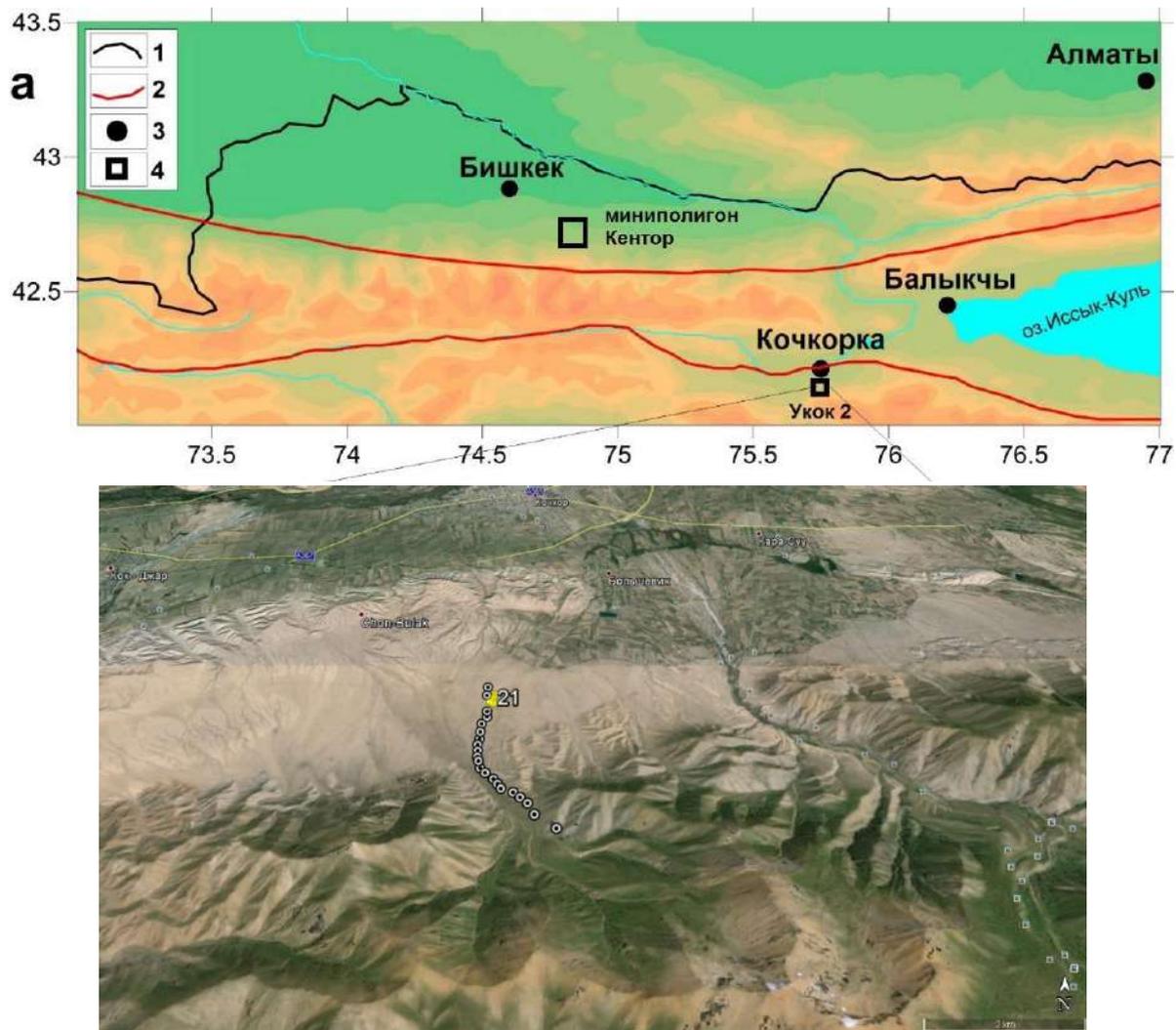


**Во второй год реализации проекта РФФИ №20-05-00475 получены следующие научные результаты.**

**1. Качественные записи режимных измерений сейсмического и электромагнитного полей в пунктах геофизического мониторинга на территории Тянь-Шаня.**

Особенность такого рода наблюдений заключается в переходе от рассмотрения квазигармонических полей в методе магнитотеллурического зондирования (МТЗ) к понятию импульсных полей (путем прореживания наблюдаемого поля). Дело в том, что сигналы от источников акустической эмиссии и электромагнитного излучения в земной коре представляют собой импульсы с широким спектром частот, испускаемые раскрывающимися трещинами при необратимых деформациях горной породы.

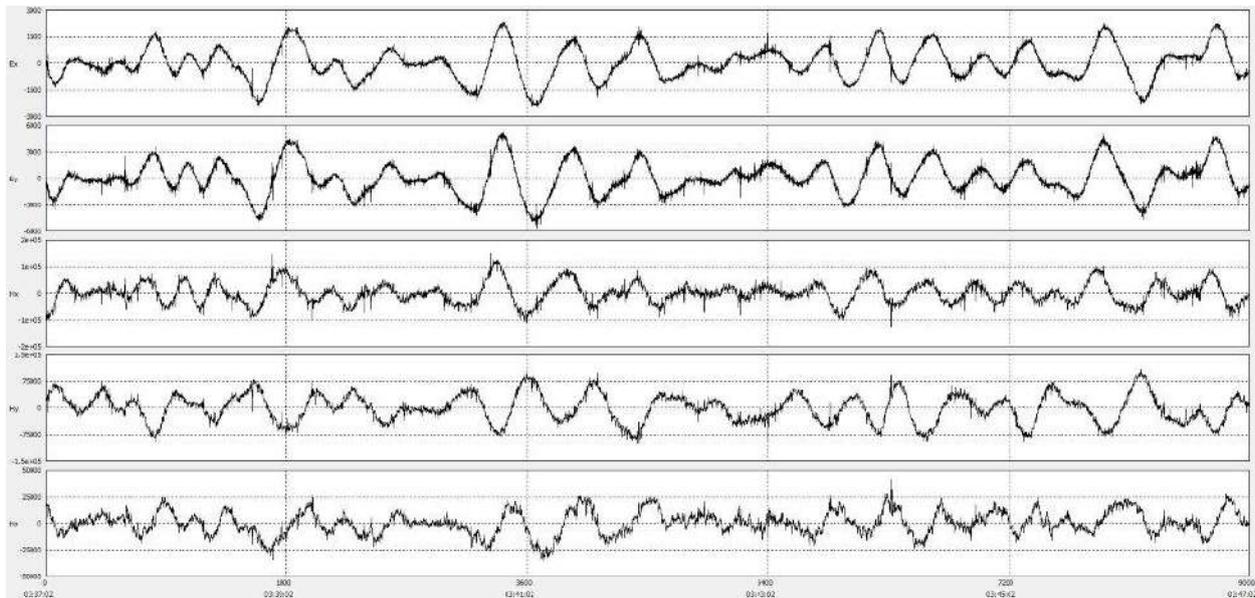
В период с 25 августа (08:08:00 UTC) по 07 сентября 2021 г. (03:26:00 UTC) выполнены полевые работы по глубинному магнитотеллурическому зондированию в пункте №21 профиля “Укок-2”, пересекающего южный борт Кочкорской впадины (рис.1). При этом использовалась измерительная станция Phoenix MTU-5 №1571 в штатном режиме регистрации МТ-поля. Район проведения МТ-работ характеризуется полным отсутствием промышленных помех. Выполнены калибровки регистратора и датчиков измерительной станции. Перед началом рабочей записи, согласно заданию, проводилась контрольная запись продолжительностью 1 час. Продолжительность регистрации МТ-поля в пункте наблюдения составила 235 часов. Полевая обработка выполнена в стандартном варианте с помощью программы SSMT2000, с варьированием по времени записи до получения 3 наилучших результатов. Критерием оценки качества являлось получение максимально протяженных кривых  $\rho_k(T)$  и  $\varphi(T)$  до значений  $T=10000$  секунд с минимальным количеством отскоков от средних значений. Файлы рабочих записей, результаты полевой обработки, EDI и DAT-файлы занесены в архив данных МТЗ.



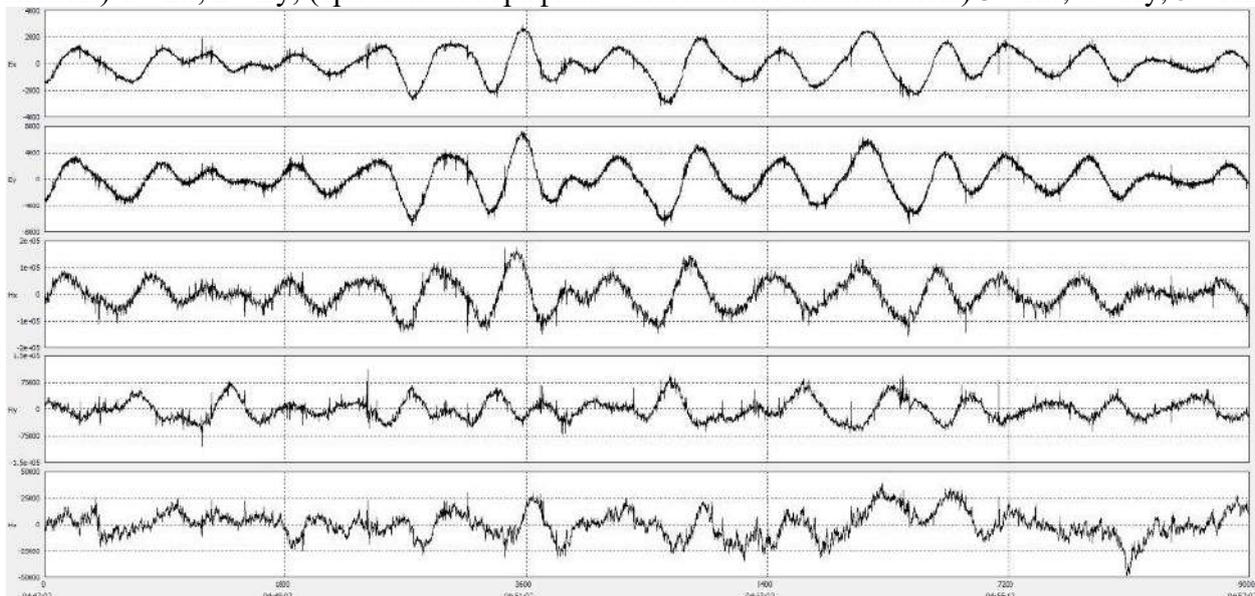
**Рис. 1.** Пункты МТЗ профиля Укок-2 (пункт № 21 – мониторинговые наблюдения).

**Верхняя панель:** карта-схема режимных магнитотеллурических наблюдений на территории Северного Тянь-Шаня. 1 – граница Киргизии; 2 – основные разломные зоны; 3 – основные населенные пункты; 4 – расположение МТ- профиля Укок-2. **Нижняя панель:** увеличенная карта с рельефом местности в районе профиля Укок-2. Белыми точками показаны пункты магнитотеллурических наблюдений.

Рассмотрим примеры записей временных рядов 5-ти компонент электромагнитного поля в пункте длительных магнитотеллурических наблюдений (№21) на профиле Укок-2.



**Рис. 2.** Пример записи временного ряда электромагнитного поля 30.08.2021 (03:37:02-03:47:02 UTC) для пункта мониторинга 21 на профиле Укок-2. Панели: (два верхних графика – электрические компоненты) 1 -  $E_x$ , 2 -  $E_y$ ; (три нижних графика – магнитные компоненты) 3 -  $H_x$ , 4 -  $H_y$ , 5 -  $H_z$



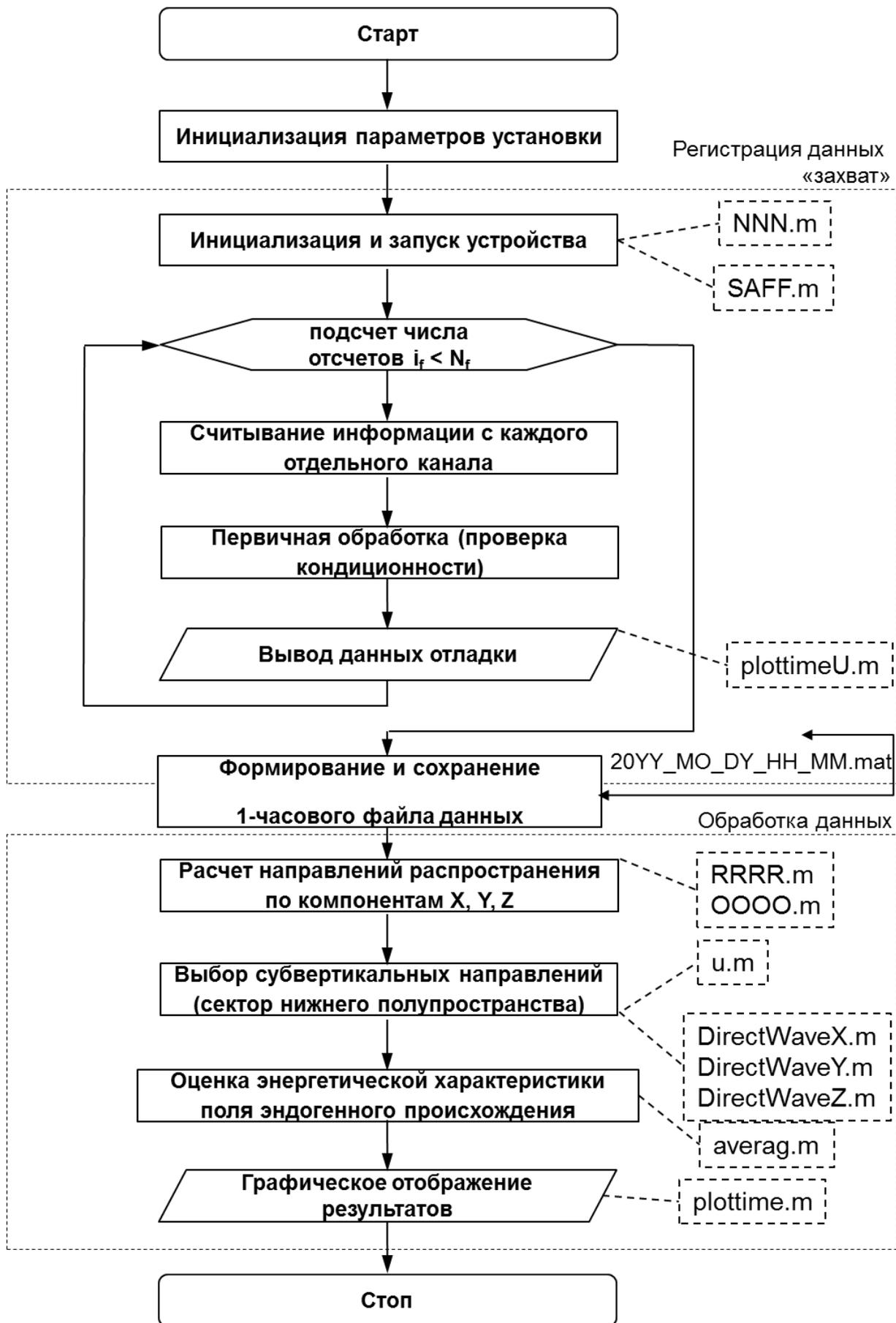
**Рис. 3.** Пример записи временного ряда электромагнитного поля 02.09.2021 (04:47:02-04:57:02 UTC) для пункта мониторинга 21 на профиле Укок-2. Панели: (два верхних графика – электрические компоненты) 1 -  $E_x$ , 2 -  $E_y$ ; (три нижних графика – магнитные компоненты) 3 -  $H_x$ , 4 -  $H_y$ , 5 -  $H_z$

**Продолжение регистрации сейсмического поля с использованием градиентной установки в непрерывном режиме.**

Эксперимент по регистрации сейсмического поля был продолжен в 2021 году с января по август. При этом градиентная сейсмическая установка была установлена на территории базы Научной станции, где получены записи временных рядов сейсмического поля. Регистрация сейсмического поля производилась 18 каналами в непрерывном режиме. Измерения сейсмического поля представляют собой аналоговые сигналы с диапазоном изменения от -5 до +5 В, которые проявляются в общем случае как фоновый шум. Длительность записи в одном файле \*.mat составляет 1 час (3600 с). Общий вид записи и описание каналов были приведены в отчете за 2020 г.

Полученные результаты преобразуются в интегральные значения, в совокупности называемые энергетической характеристикой сейсмического поля эндогенного происхождения. По своим свойствам она аналогична амплитуде и получается путем усреднения в 1-часовом окне для сглаживания резких скачкообразных колебаний. Таким образом, за полный день получается 24 значения энергетической характеристики для каждого из трех направлений (X, Y, Z). Общая блок-схема процесса записи и их последующей обработки показана на рис. 4. Программа регистрации колебаний («захвата» данных) состоит из 3 основных подпрограмм. Программа обработки данных, записанных сейсмической градиентной установкой из файлов \*.mat, состоит из 8 основных подпрограмм:

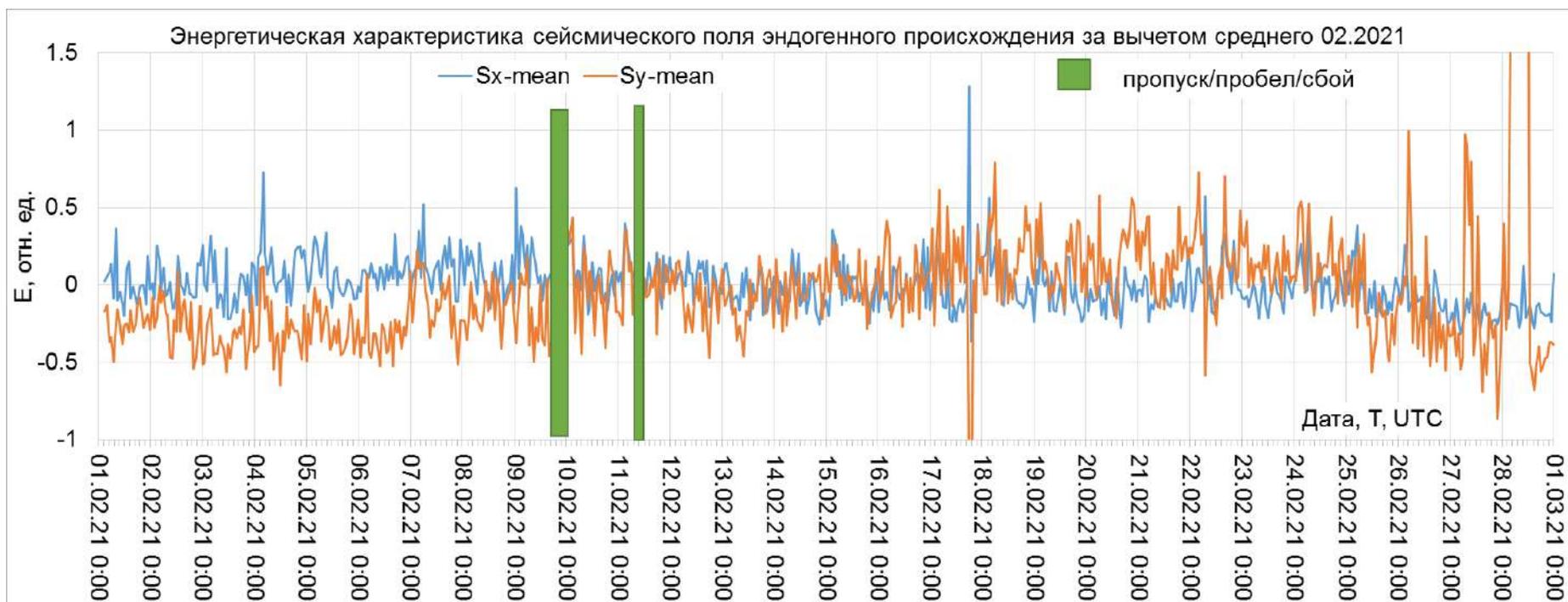
- "RRRR.m" переименовывает файлы и преобразует mat-файлы в один тип;
- "OOOO.m" - основная программа обработки данных, основанная на вычислительной возможности пространственной фильтрации сигнала по направлению путем выбора соответствующих нормальных векторов (). В этом случае сигналы не фильтруются в частотном диапазоне, а обрабатываются во временной области;
- "DirectWaveX.m" реализует алгоритм расчета направления прихода волны вдоль оси X;
- "DirectWaveY.m" реализует алгоритм расчета направления прихода волны вдоль оси Y;
- "DirectWaveZ.m" реализует алгоритм вычисления направления прихода волны вдоль оси Z;
- "u.m" реализует вычисление функции Хевисайда;
- алгоритм усреднения "averag.m";
- алгоритм отображения входных данных и результатов расчетов" plottime.m".

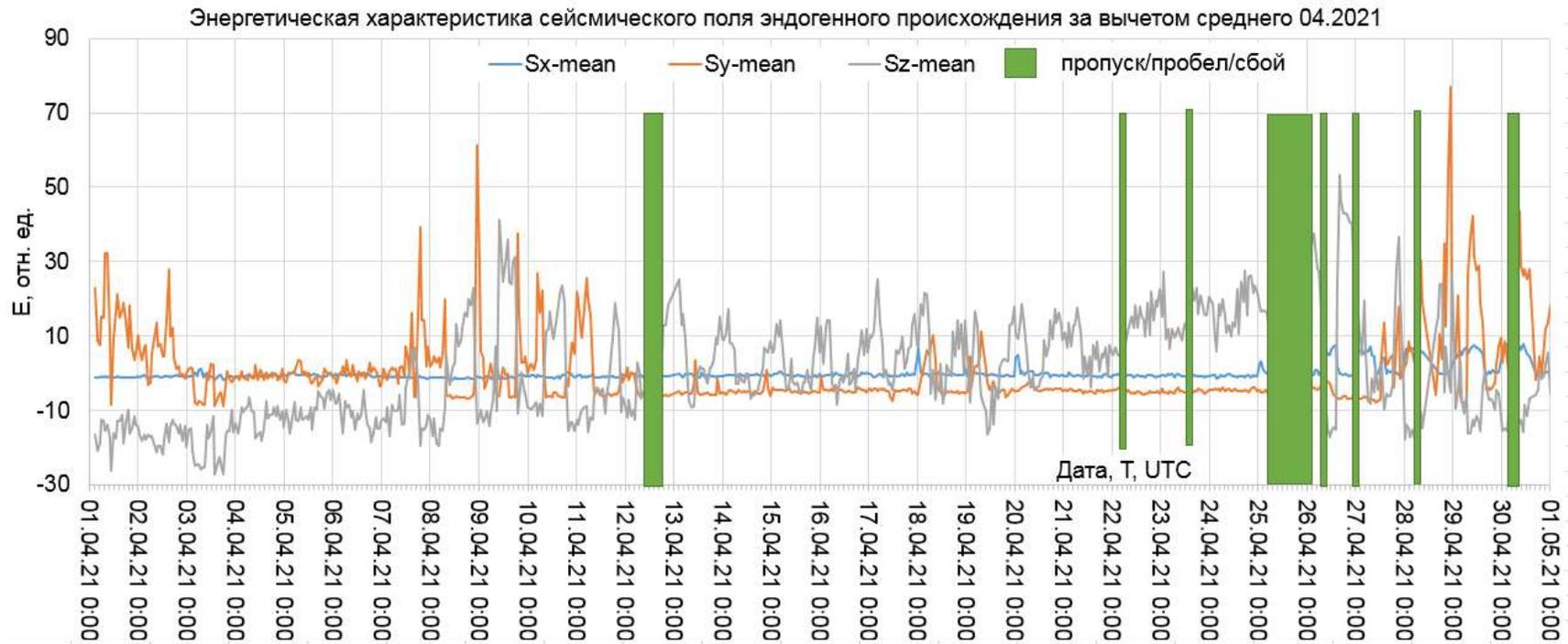


**Рис. 4.** Общая схема процесса обработки для сейсмической градиентной установки

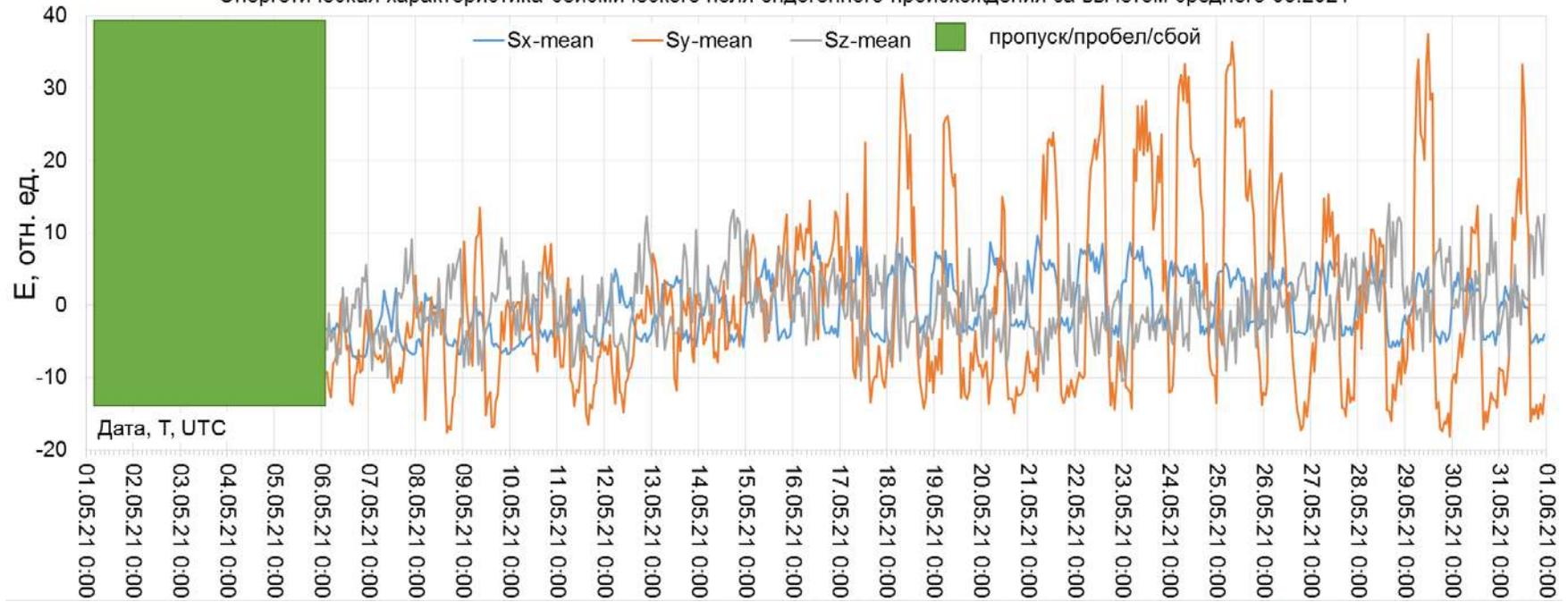
В августе 2021 г. градиентная установка подверглась модернизации - оснащена новыми современными компонентами элементной базы и дополнена ещё тремя каналами. Поэтому в августе-сентябре 2021 г. работа градиентной установки в обновленном варианте в пункте №21 профиля Укок-2 (Кочкорская впадина) носила экспериментально-тестовый характер. Полевые материалы этих наблюдений требуют отдельного анализа, результаты которого будут представлены в 2022 году.

В качестве примера ниже приведены иллюстрации сейсмических данных (энергетические характеристики сейсмического поля эндогенного происхождения) из доступного архива записей градиентной установки за первое полугодие 2021 года.

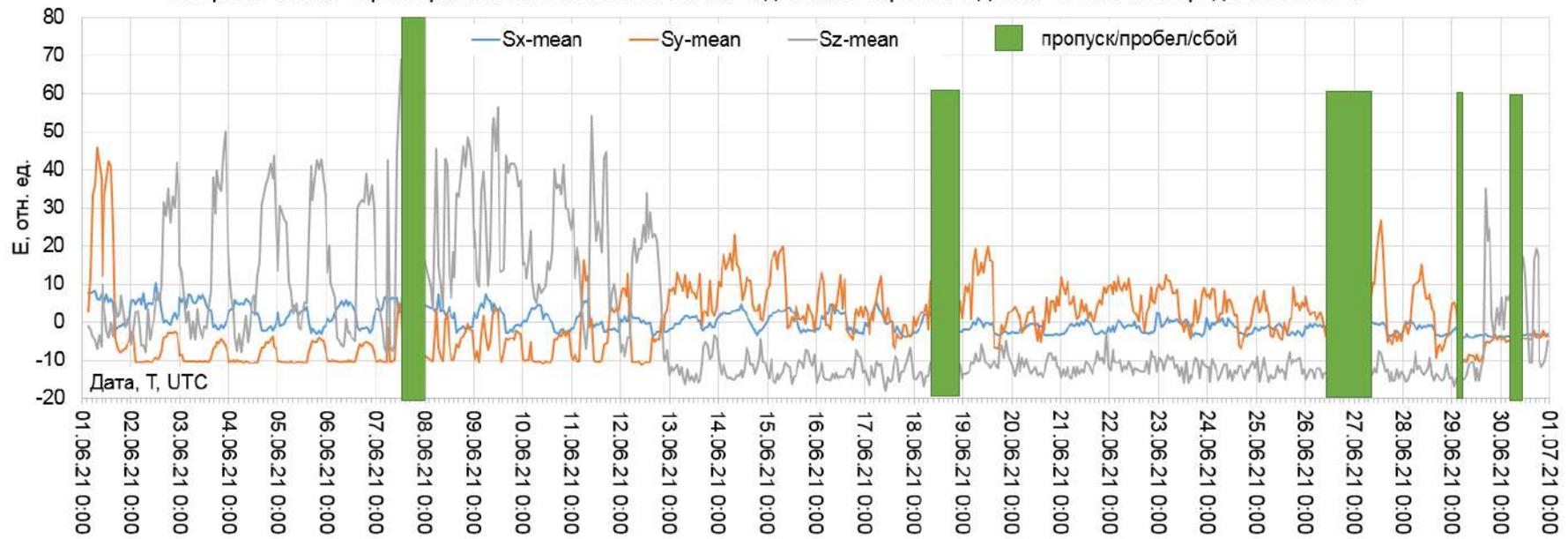




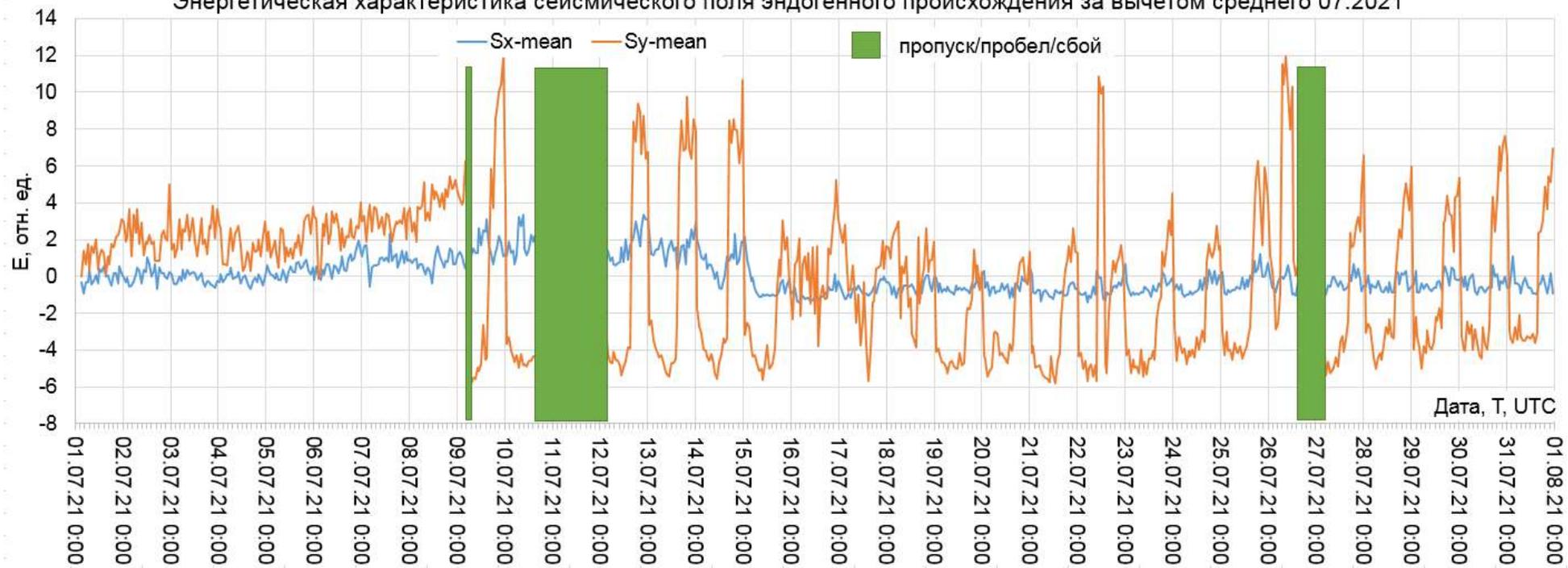
Энергетическая характеристика сейсмического поля эндогенного происхождения за вычетом среднего 05.2021



Энергетическая характеристика сейсмического поля эндогенного происхождения за вычетом среднего 06.2021



Энергетическая характеристика сейсмического поля эндогенного происхождения за вычетом среднего 07.2021



## 2. Разработка подхода к анализу характеристик геодинамических процессов с использованием оценок вектора геодинамических процессов, полученных по результатам обработки экспериментальных данных сейсмо-электромагнитных наблюдений.

Объектом исследования геофизического мониторинга современных геодинамических процессов являются любые изменения в геологической среде (естественного или техногенного характера), происходящие в настоящее время и отражающиеся в физических полях и физических параметрах горной породы, в частности, электромагнитных и сейсмических. Целью геофизического мониторинга современных геодинамических процессов является изучение изменений в геологической среде, их оценка и прогноз развития. Не исследуя физико-геологического обоснование геофизического мониторинга современных геодинамических процессов, будем рассматривать их как динамическую систему. В таком формальном подходе под системой будем понимать совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом и образующих новую качественную целостность. Динамика этой системы связана как с изменением ее отдельных частей, так и с изменениями связей между элементами этой системы. Для определения параметров системы будем использовать временные ряды представляющие собой физические поля, воздействующие на систему, а, именно, поля эндогенного происхождения, которые, например, в случае магнитотеллурического зондирования можно выделить из наблюдаемого поля с помощью оригинальной методики разделения электромагнитного поля по положению источников [Александров, Рыбин, Забинякова, 2018].

В геодинамическом смысле, прежде всего, необходимо определить систему, которая отвечает за изменения геологической среды во времени. При этом следует различать разные масштабы времени – интервал времени, по которому определяется система, и интервал времени, намного больший, в пределах которого меняется сама система.

**Системный анализ временных рядов.** Для получения новой качественной информации необходимо использовать независимую информацию, т.е. использовать те временные ряды, которые не связаны между собой непосредственно, их зависимость - опосредованная, через параметры системы. Мерой линейной независимости (или зависимости) двух функций времени является коэффициент корреляции. Пусть даны две функции  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$ , времени  $t \in [a, b]$ .

Для оценки величину линейной независимости или зависимости будем использовать матрицу коэффициентов корреляции  $K = \{k_{ij}\}$  по наблюдаемым данным, где  $k_{ij} = \frac{\int_a^b f_i(t)f_j(t)dt}{\int_a^b f_j(t)f_j(t)dt}$ ,

$i = \{1: N\}$ ,  $j = \{1: N\}$ ,  $N$  - количество точек наблюдения.

Матрица  $K$  - симметричная, ее можно представить в виде  $K = v[\lambda]v^{-1}$ , где  $v$  - матрица, составленная из собственных векторов матрицы  $K$ ,  $[\lambda]$  - диагональная матрица собственных значений матрицы  $K$ .

Выделим из матрицы  $K$  матрицу с минимальной корреляцией  $K_N$ . Для этого представим ее собственные значения  $[\lambda] = \begin{bmatrix} [\lambda_+] & [0] \\ [0] & [\lambda_-] \end{bmatrix}$ , где  $[\lambda_+]$  - диагональная матрица с большими, по модулю, величинами собственных значений матрицы  $K$ ,  $[\lambda_-]$  - диагональная матрица с малыми, по модулю, величинами собственных значений матрицы  $K$ , например, не превышающих по абсолютной величине  $0.1 \max(|\lambda|)$ ,  $[0]$  - нулевая матрица соответствующей размерности.

Тогда матрица  $K_N$  с некоррелированными функциями времени можно найти из

$$K_N = v \begin{bmatrix} 0 \cdot [\lambda_+] & [0] \\ [0] & [\lambda_-] \end{bmatrix} v^{-1} = v \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [\lambda_-] \end{bmatrix} v^{-1}$$

В результате этой операции можно выделить функции времени  $f_i(t)$ , которые обладают наименьшей коррелированностью и, следовательно, наименьшей линейной зависимостью друг от друга. В итоге будут отобраны такие функции времени, которые являются максимально независимыми. Это необходимо для построения математической модели системного анализа временных рядов в рамках решения динамической задачи.

Также отметим, что в результате отбора таких функций времени появляется возможность установить пространственные области развития современных геодинамических процессов.

**Динамическая задача.** После того, как отобраны такие функции  $f_i(t)$  (пусть они образуют

количество  $m$ ), их можно свести в вектор-функцию времени  $\mathbf{X}(t) = \begin{pmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \dots \\ f_m(t) \end{pmatrix}$ . Рассмотрим интервал

времени  $\Delta t$ , в пределах которого система изменяется слабо. Тогда можно предположить, что в близких интервалах времени существует линейная связь

$$\mathbf{X}(t + \Delta t) = A\mathbf{X}(t) = ([1] + \Delta t B)\mathbf{X}(t) \quad (1)$$

$B$  - матрица, характеризующая изучаемую систему,  $[1]$  - единичная матрица соответствующей размерности.

Это выражение является основой для построения моделей динамических процессов. Переходя к пределу  $\Delta t \rightarrow 0$ , получим

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbf{X}(t + \Delta t) - \mathbf{X}(t)}{\Delta t} \Bigg|_{\Delta t \rightarrow 0} = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{X}(t) = B\mathbf{X}(t) \quad (1A)$$

Данная системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка является классической математической моделью при изучении широкого класса динамических процессов.

Формальным описанием динамической системы является матрица  $B$ . Предполагается, что она за некоторый интервал времени  $\Delta T$  (включающее измерения во времени с шагом  $\Delta t$ ) не меняется, в то время как вектор  $X$  может меняться достаточно произвольно. Матрица  $B$  полностью описывает внутреннюю структуру, состояние и свойства геодинамической системы.

А изменение системы во времени будет определяться изменением матрицы  $B$ . Эти формально описываемые изменения динамических систем являются предметом исследования при системном анализе современных геодинамических процессов по геофизическим данным.

*Основной целью проводимых исследований является нахождение матрицы  $B$  и ее анализ.*

**Нахождение матрицы  $B$ .** Определение элементов этой матрицы фактически является нахождение решения обратной задачи (восстановление коэффициентов дифференциальных уравнений). Поэтому данный этап можно рассматривать как решение обратной задачи электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов.

Для нахождения матрицы  $B$  представим систему уравнений в виде

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}(t) = \mathbf{X}(t + \Delta t) - \mathbf{X}(t) = B\Delta t\mathbf{X}(t).$$

Перейдем к дискретным представлениям – вместо функций времени будем рассматривать временные ряды. Пусть известны вектора  $\mathbf{Y}(t_j)$  и  $\mathbf{X}(t_j)$  в момент времени  $t_j$ . Введем составные матрицы

$$Y = [\mathbf{Y}(t_1), \mathbf{Y}(t_2), \dots, \mathbf{Y}(t_n)]$$

$$X = [\Delta t_1 \mathbf{X}(t_1), \Delta t_2 \mathbf{X}(t_2), \dots, \Delta t_n \mathbf{X}(t_n)]$$

$$n \gg m,$$

$\Delta t_j, j = 1, n$  - интервалы времени, через которые были проведены измерения и которые

могут быть различными,  $n$  - количество измерений. Интервал времени  $t_n - t_1 = \Delta T_n$  - кадр, интервал времени, в течении которого произведено  $n$  измерений.

Тогда векторная система уравнений сведется к матричной системе уравнений относительно матрицы  $B$  вида

$$Y = BX \quad (2)$$

из которой можно найти матрицу  $B$ .

Полученная матричная система уравнений является переопределенной. В силу этого решение будет иметь вид

$$B = ((XX^T)^{-1}(XY^T))^T = VDV^{-1}$$

где  $^T$  - знак операции транспонирования матрицы, где  $V$  - матрица, составленная из собственных векторов матрицы  $B$ ,  $[D]$  - диагональная матрица собственных значений матрицы  $B$ .

Необходимо, чтобы матричная система уравнений (2) была переопределенной, поскольку это позволит оценить точность построенной математической модели согласно оценки  $O = \|Y - BX\|$ . В противном случае, например, при нормально определенной системе матричных уравнений, оценить точность построенной модели не представляется возможным, поскольку всегда оценка  $O$  будет равна нулю  $O = 0$ .

Найденная матрица  $B$  позволяет осуществить прогноз развития геодинамического процесса на последующий момент времени  $t_{n+1}$  согласно выражения, вытекающего из (1)

$$\mathbf{X}(t_{n+1}) = ([1] + (t_{n+1} - t_n)B)\mathbf{X}(t_n).$$

Если в момент времени  $t_{n+1}$  известен вектор  $\tilde{\mathbf{X}}(t_{n+1})$ , то можно определить отклонение прогнозных значений от фактических  $\Delta \mathbf{X} = \mathbf{X}(t_{n+1}) - \tilde{\mathbf{X}}(t_{n+1})$ . Если изменения  $\Delta \mathbf{X}$  в разных точках пространства происходят синхронно, то это означает, что в данный момент происходит изменение всей системы. В противном случае, изменение системы не происходит, а изменения  $\Delta \mathbf{X}$  связаны с другими факторами, такими как, например, помехи.

Далее сдвинув все данные на шаг дискретизации, сдвинув кадр на одно измерение, интервал времени которого будет  $\Delta T_{n+1} = t_{n+1} - t_n$ , и проведя всю описанную выше процедуру нахождения матрицы  $B$ , получим временной ряд отклонений прогнозных значений от фактических по всем оставшимся временным рядам.

Если изменения происходят синхронно, то это означает, что система меняется во времени и имеет место геодинамический процесс.

#### **Вектор геодинамических процессов.**

Введем понятие вектора геодинамических процессов. Известно, что сила - векторная величина, которая характеризуется модулем (величина этой силы) и направлением (направление действия этой силы). Аналогично для матрицы  $B$ : собственные значения характеризуют мощность (силу) геодинамического процесса, собственные вектора - направление действия

геодинамического процесса. Векторную величину  $\mathbf{G} = \sum_{i=1}^m d_i \mathbf{V}_i$  (3) назовем вектором современных геодинамических процессов в момент времени  $t$ , полученный за предыдущий интервал времени наблюдений  $\Delta T$  (используя ретроспективные данные), где  $d_i$  - собственное значение и соответствующий ему собственный вектор  $\mathbf{V}_i$  матрицы  $B$ .  $\Delta T$  - есть интервал времени вычисления матрицы  $B$ , которая приписывается времени  $t$ , т.е. времени современного геодинамического процесса. Он смещается каждый раз, когда производятся измерения в последующие моменты времени и остается постоянным. Фактически это означает, что  $\Delta T$  - скользящий интервал времени.

Вектор современных геодинамических процессов является суммой отдельных векторов геодинамических процессов. Отдельный вектор геодинамических процессов определяется направлением (собственный вектор единичной длины), и величиной - соответствующим собственным значением. Его длина есть модуль собственного значения. Соответственно, вектор современных геодинамических процессов будет характеризовать величину этого процесса (его энергетику) в целом, и его общую направленность как сумму отдельных геодинамических процессов.

Если ввести вектор  $\mathbf{D} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_m \end{pmatrix}$ , составленный из собственных значений матрицы  $B$ , то

вектор современных геодинамических процессов можно представить в виде  $\mathbf{G} = \mathbf{V}\mathbf{D}$ .

В силу измерений в конечные интервалы времени следует рассматривать относительные величины. Для двух векторов, полученных в моменты времени  $T_j$  и  $T_{j-1}$ , где  $T_j$  есть время к которому приписан результат вычисления матрицы  $B$ , изменение во времени геодинамических процессов опишем как скалярное произведение двух векторов  $\mathbf{G}_j \mathbf{G}_{j-1} = |\mathbf{G}_j| |\mathbf{G}_{j-1}| \cos(\Delta\varphi_j)$ . Основание введения этой операции заключается в том, что вектор  $\mathbf{G}$  многомерный вектор, представляющий собой вектор-столбец, представить который в многомерном пространстве невозможно. Однако по аналогии с двух-трехмерным пространством возможно произвести анализ его изменения во времени. Для этого необходимо определить геодинамический смысл введенных величин с целью последующей интерпретации.

**Мощность, структура и направление геодинамических процессов.** Введем отношение модулей векторов  $\Delta E_j = \frac{|\mathbf{G}_j|}{|\mathbf{G}_{j-1}|}$ , которое указывает на изменение энергетики (мощности)

геодинамического процесса, и разность  $\Delta\varphi_j = \varphi_j - \varphi_{j-1}$  - изменение направления (структурно-текстурного строения) этих процессов. Тогда

$$\mathbf{G}_j \mathbf{G}_{j-1} = |\mathbf{G}_j| |\mathbf{G}_{j-1}| \cos(\Delta\varphi_j) = \frac{|\mathbf{G}_j|}{|\mathbf{G}_{j-1}|} |\mathbf{G}_{j-1}|^2 \cos(\Delta\varphi_j) = \Delta E_j |\mathbf{G}_{j-1}|^2 \cos(\Delta\varphi_j)$$

Между  $\Delta E_j$  и  $\Delta\varphi_j$  существует причинно-следственная связь. Сначала происходит изменение внутренней энергетики системы в результате воздействия на систему внешних факторов (физических полей) с переходом одного вида энергии в другой. Изменение внутренней энергии системы приводит к изменению ее структурно-текстурного строения. Это изменение происходит с задержкой по времени. Иными словами, нельзя изменить структуру системы, не изменив ее внутреннюю энергию.

В настоящее время данный подход, на основе понятия вектора современных геодинамических процессов, проходит свою первую апробацию с использованием математического моделирования. Активно идет подготовка материалов для опробования алгоритма для обработки конкретных экспериментальных данных, полученных в ходе выполнения проекта на территории Тяньшанского региона.

Остановимся подробнее на результатах выполненного нами модельного эксперимента. Общий входной массив синтетических данных представлял собой 80 временных рядов длительностью 120000 отчетов каждый, которые были сформированы в МАТЛАБе с помощью генератора случайных чисел, распределенных по нормальному закону. В эту входную матрицу (шумовое поле) во временные ряды с номерами 5, 10, 25, 50 были добавлены 4 детерминированные (гармонические) функции – синусоиды со сдвигом. Эти функции и их поведение во времени имитировали нам изучаемую с помощью предлагаемого алгоритма динамическую систему.

Фрагмент программы моделирования включаемых в общий массив детерминированных функций:

```
D(5,:)=1*D(5,:)+2*sin(nw*pi*([1:max(size(D(5,:)))])/30);  
D(10,:)=1*D(10,:)+2*sin((nw*pi*([1:max(size(D(10,:)))])/30)+2*pi/16);  
D(25,:)=1*D(25,:)+2*sin((nw*pi*([1:max(size(D(25,:)))])/30)+4*pi/16);  
D(50,:)=1*D(50,:)+2*sin((nw*pi*([1:max(size(D(50,:)))])/30)+6*pi/16);
```

Моделирование осуществлялось с разбиением длины временного ряда на 40 интервалов по 3000 отсчетов в каждом. По этим 3000 отсчетам и 80 временным рядам находились четыре детерминированные функции на основе чего находился вектор современных геодинамических процессов. Далее брался следующий интервал и также вычислялся этот вектор и т.д. В результате получен модуль вектора современных геодинамических процессов по 40 интервалам времени.

Моделировались несколько ситуаций.

**Случай 1.** Отсутствие системы (обнуление синусоид).

```
D(5,:)=1*D(5,:)+0*sin(nw*pi*([1:max(size(D(5,:)))])/30);  
D(10,:)=1*D(10,:)+0*sin((nw*pi*([1:max(size(D(10,:)))])/30)+2*pi/16);  
D(25,:)=1*D(25,:)+0*sin((nw*pi*([1:max(size(D(25,:)))])/30)+4*pi/16);  
D(50,:)=1*D(50,:)+0*sin((nw*pi*([1:max(size(D(50,:)))])/30)+6*pi/16);
```

В этом случае модуль вектора современных геодинамических процессов был равен нулю.

**Случай 2.** Система не изменяется (синусоиды одинаковые),  $nw=2$ .

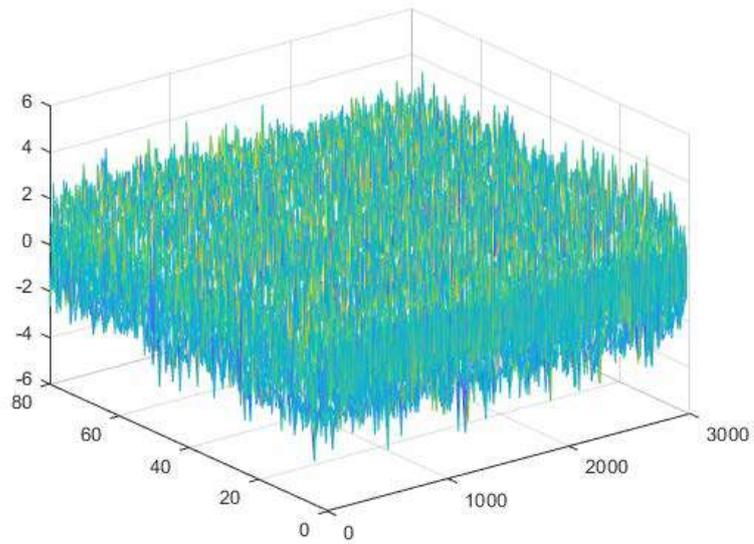
```
D(5,:)=1*D(5,:)+2*sin(nw*pi*([1:max(size(D(5,:)))])/30);  
D(10,:)=1*D(10,:)+2*sin((nw*pi*([1:max(size(D(10,:)))])/30)+2*pi/16);  
D(25,:)=1*D(25,:)+2*sin((nw*pi*([1:max(size(D(25,:)))])/30)+4*pi/16);  
D(50,:)=1*D(50,:)+2*sin((nw*pi*([1:max(size(D(50,:)))])/30)+6*pi/16);
```

В этом случае модуль вектора современных геодинамических процессов равен константе, отличной от нуля.

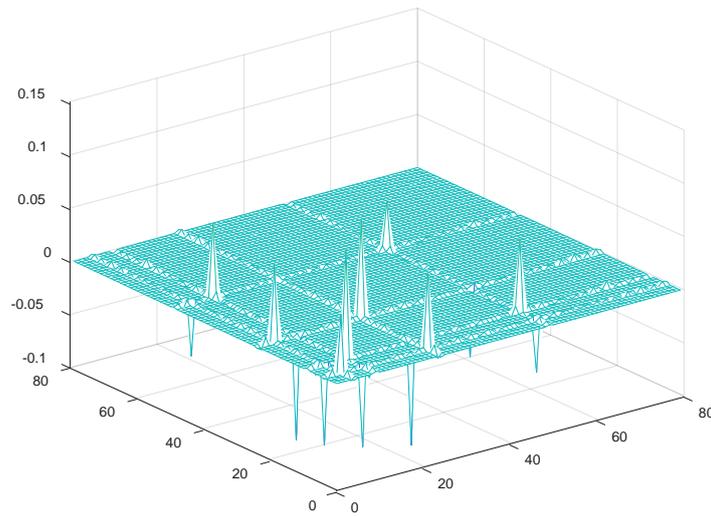
**Случай 3.** Система меняется (изменение частоты синусоид без сдвига),  $nw=1+1.0*(k-1)$ ;

( $k$  – номер интервала изменяется от 1 до 40).

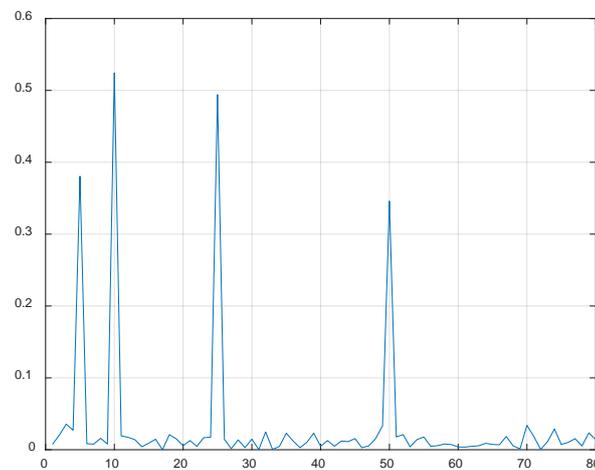
```
D(5,:)=1*D(5,:)+2*sin(nw*pi*([1:max(size(D(5,:)))])/30);  
D(10,:)=1*D(10,:)+2*sin((nw*pi*([1:max(size(D(10,:)))])/30)+0*pi/16);  
D(25,:)=1*D(25,:)+2*sin((nw*pi*([1:max(size(D(25,:)))])/30)+0*pi/16);  
D(50,:)=1*D(50,:)+2*sin((nw*pi*([1:max(size(D(50,:)))])/30)+0*pi/16);
```



**Рис. 5.** Фрагмент одного интервала исходных данных.

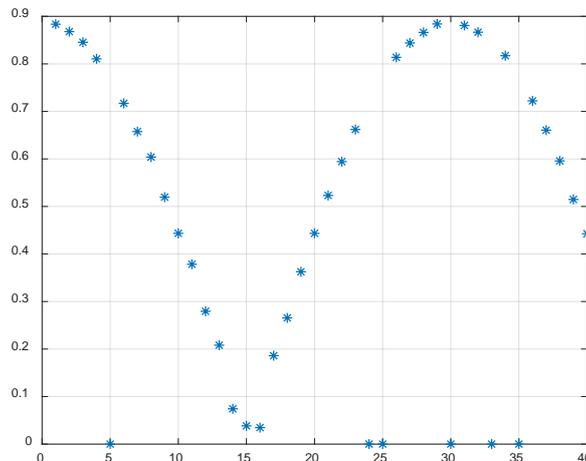


**Рис.6.** Коэффициенты корреляции для минимальных собственных значений матрицы корреляции.



**Рис. 7.** Сумма абсолютных значения по столбцам матрицы коэффициентов корреляции.

Из графика (рис. 7) выделяются детерминированные функции с номерами 5, 10, 25, 40, которые участвуют в построении системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка (1А) и определении матрицы В.

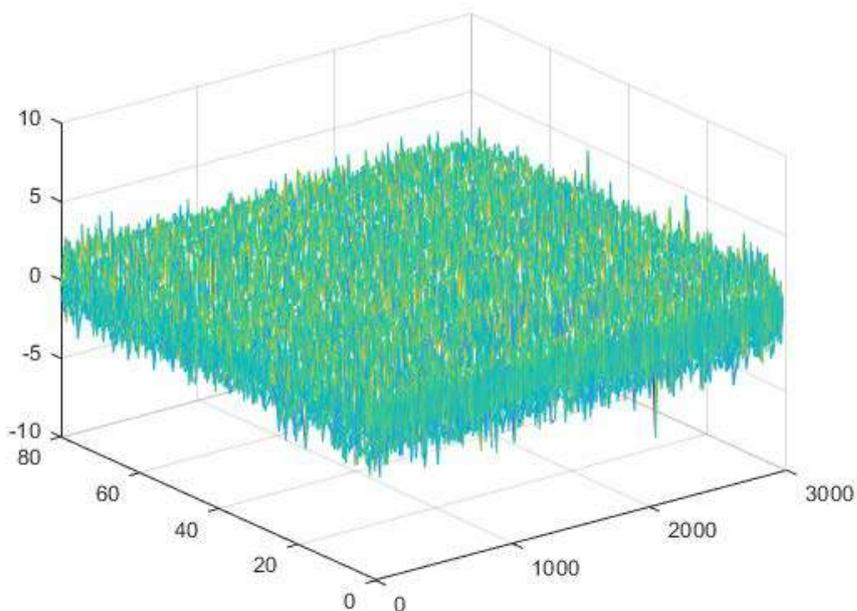


**Рис. 8.** График модуля вектора современных геодинамических процессов.

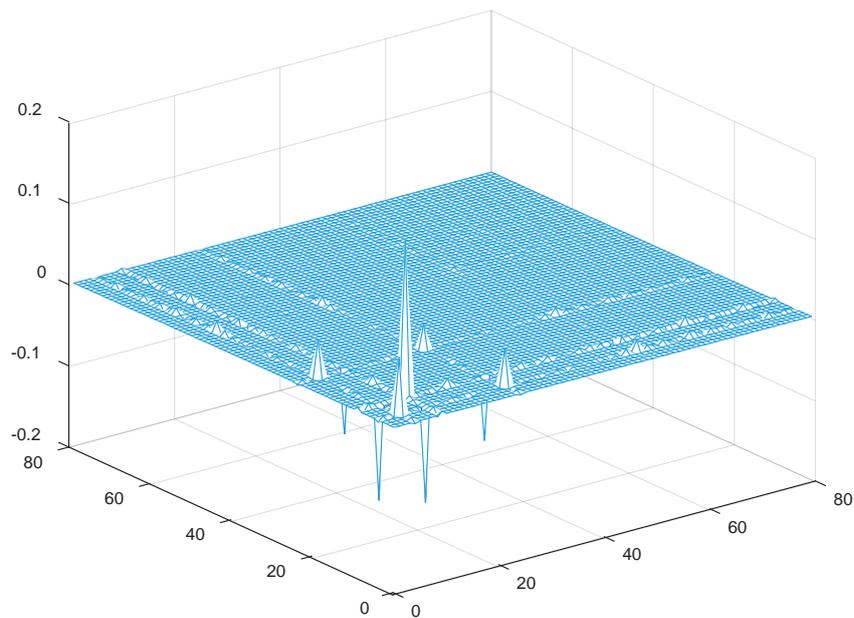
Как следует из этого рисунка, система изменяется закономерно. Значения модуля вектора, равные нулю, являются артефактами.

**Случай 4.** Система меняется (изменение частоты синусоид + сдвиг синусоид)  
 $nw=1+1.0*(k-1)$ ; ( $k$  – номер интервала изменяется от 1 до 40) с функциями со сдвигом.

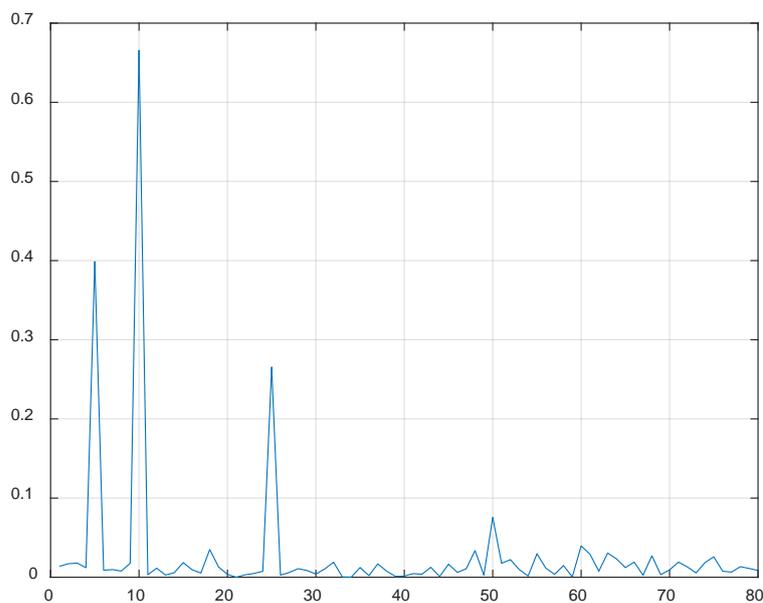
```
D(5,:)=1*D(5,:)+2*sin(nw*pi*([1:max(size(D(5,:)))]/30));
D(10,:)=1*D(10,:)+2*sin((nw*pi*([1:max(size(D(10,:)))]/30)+2*pi/16);
D(25,:)=1*D(25,:)+2*sin((nw*pi*([1:max(size(D(25,:)))]/30)+4*pi/16);
D(50,:)=1*D(50,:)+2*sin((nw*pi*([1:max(size(D(50,:)))]/30)+6*pi/16);
```



**Рис. 8.** Фрагмент одного интервала исходных данных.



**Рис. 9.** Коэффициенты корреляции для минимальных собственных значений матрицы коэффициентов корреляции.



**Рис. 10.** Сумма абсолютных значения по столбцам матрицы коэффициентов корреляции.

Из графика (рис. 10) выделяются детерминированные функции с номерами 5.10.25.40, которые участвуют в построении системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка.



быть представлена моделью с использованием наиболее общего вида линейных материальных уравнений электродинамики, а, с другой стороны, связана с извилистостью капиллярной системы электропроводности горной породы, что актуально в случае распространения в такой среде широкополосных, импульсных сигналов.

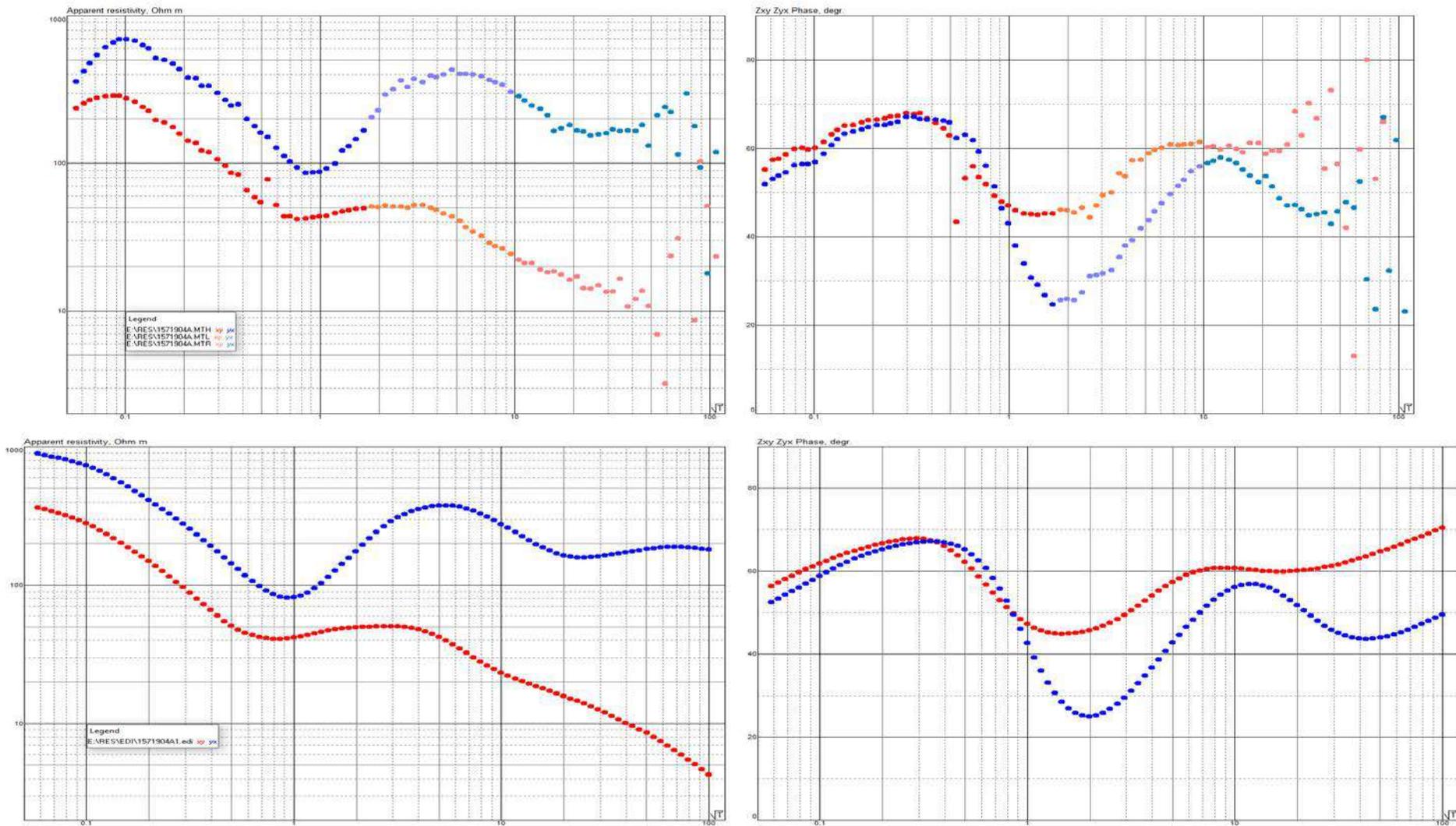
В ходе выполнения проекта получены уравнения Риккати для магнитотеллурического импеданса и адмитанса для бианизотропных сред, определяющих наиболее общие линейные электромагнитные свойства горных пород. На этой основе проведены численные эксперименты, результаты которых подтверждают возможность применения идей В.Н. Страхова к решению обратных задач МТЗ. Дальнейшее развитие данного подхода сопряжено с решением некорректных задач в силу наличия различного рода помех в экспериментальных данных.

Подробное описание обсуждаемого подхода и полученных результатов (с формулами и рисунками) можно найти в научной статье: Александров П.Н., Забинякова О.Б. Об обратной задаче геофизики с позиций развития идей В.Н. Страхова // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2020. Т. 31. № 2. С. 56-69. Ссылка: <http://krasec.ru/Alexandrov312/>

#### **4. Сбор экспериментальных данных, характеризующих динамику поведения электрических параметров геосреды (проводимости и анизотропии).**

Для анализа динамики поведения электрических параметров геосреды будем использовать оценки энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения.

Отметим, что вариации кажущегося сопротивления существенно зависят от азимута, подтверждая тем самым высокую тензочувствительность анизотропии электропроводности к изменению напряженно-деформированного состояния исследуемой геосреды. Поэтому исследование взаимосвязи между анизотропией кажущегося электросопротивления и энергетической характеристикой электромагнитных полей эндогенного происхождения дает возможность получения качественно новой геолого-физической информации о современных геодинамических процессах, протекающих в литосфере Тянь-Шаня. С целью формирования информационной базы для такого анализа осуществлен сбор и дополнительный анализ экспериментальных электромагнитных данных. Рассмотрим примеры регистрации электромагнитного поля эндогенного происхождения и расчета энергетической характеристики этого поля, полученные в 2021 году для пунктов длительных электромагнитных наблюдений на территории Тянь-Шаня.



**Рис. 12.** Амплитудные кривые кажущегося сопротивления  $\rho_k(\sqrt{T})$  и фазы импеданса  $\varphi(\sqrt{T})$ . Профиль Укок-2 пункт №21.

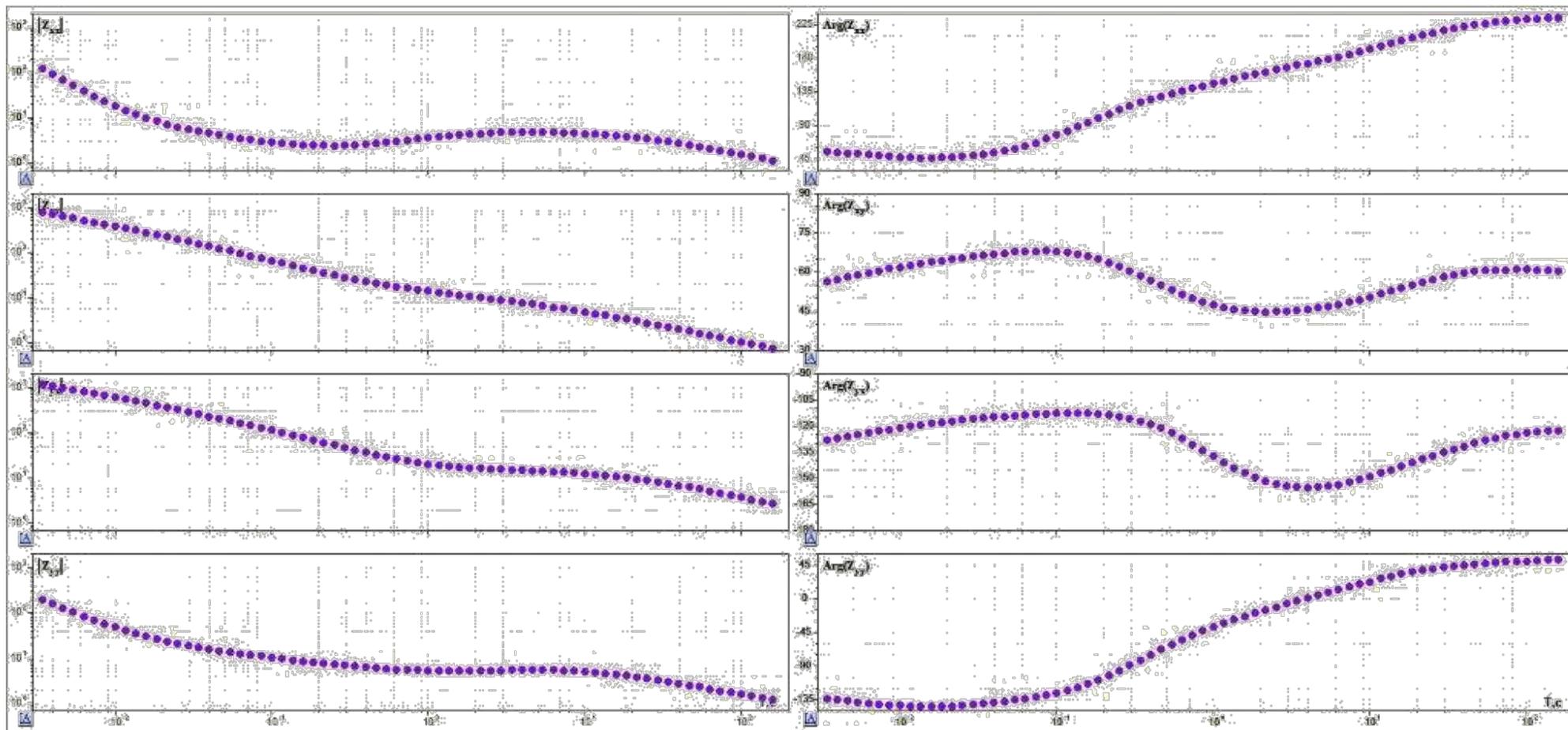


Рис. 13. Основные и дополнительные импедансы и фазовые кривые на пункте №21 Укок-2 в начале регистрации 25.08.2021.

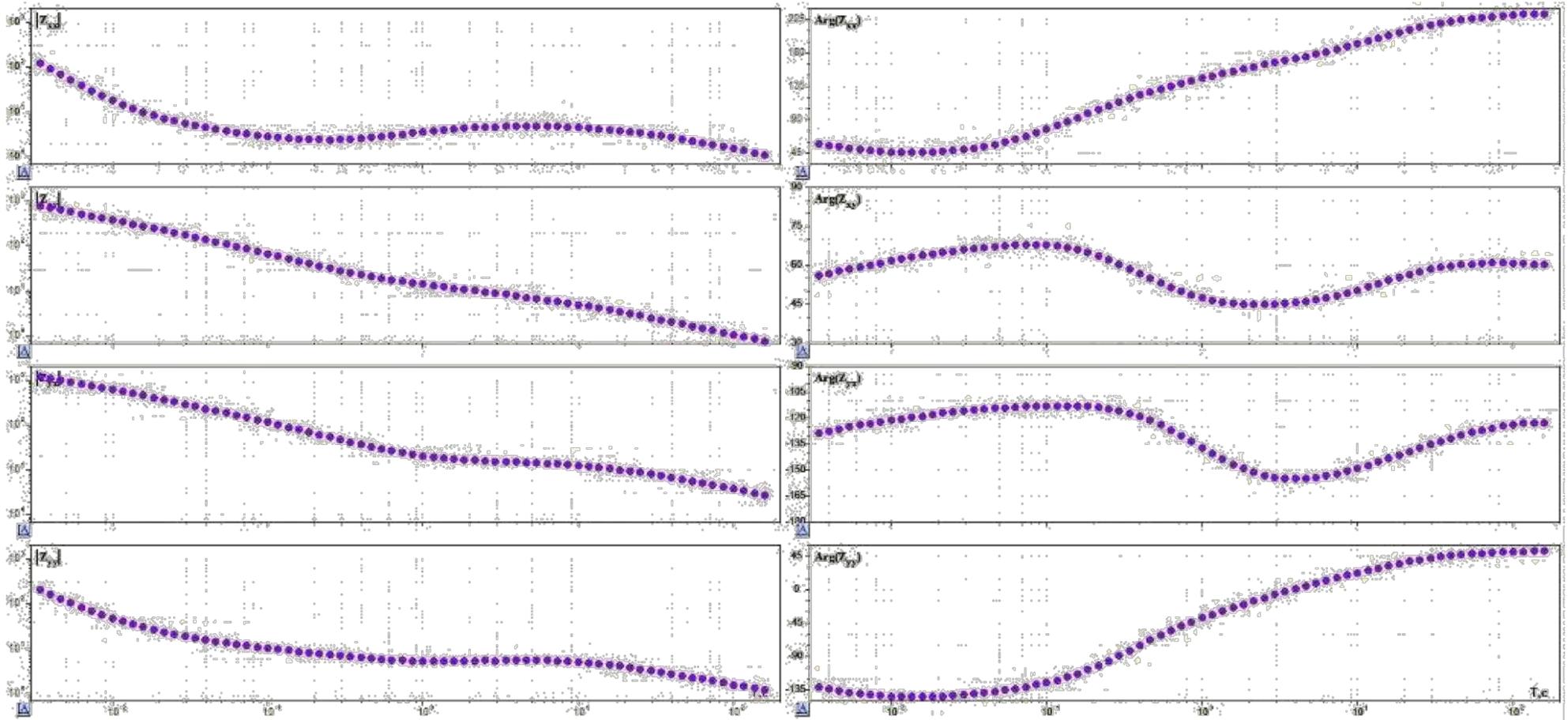
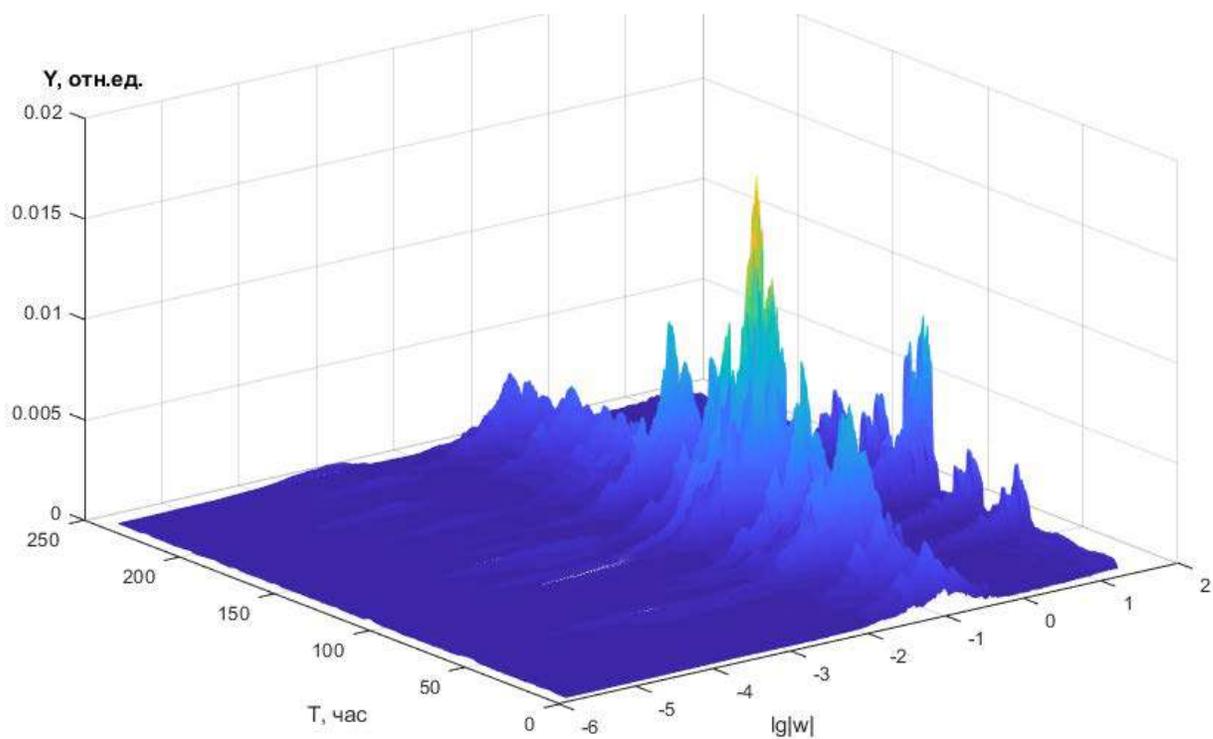
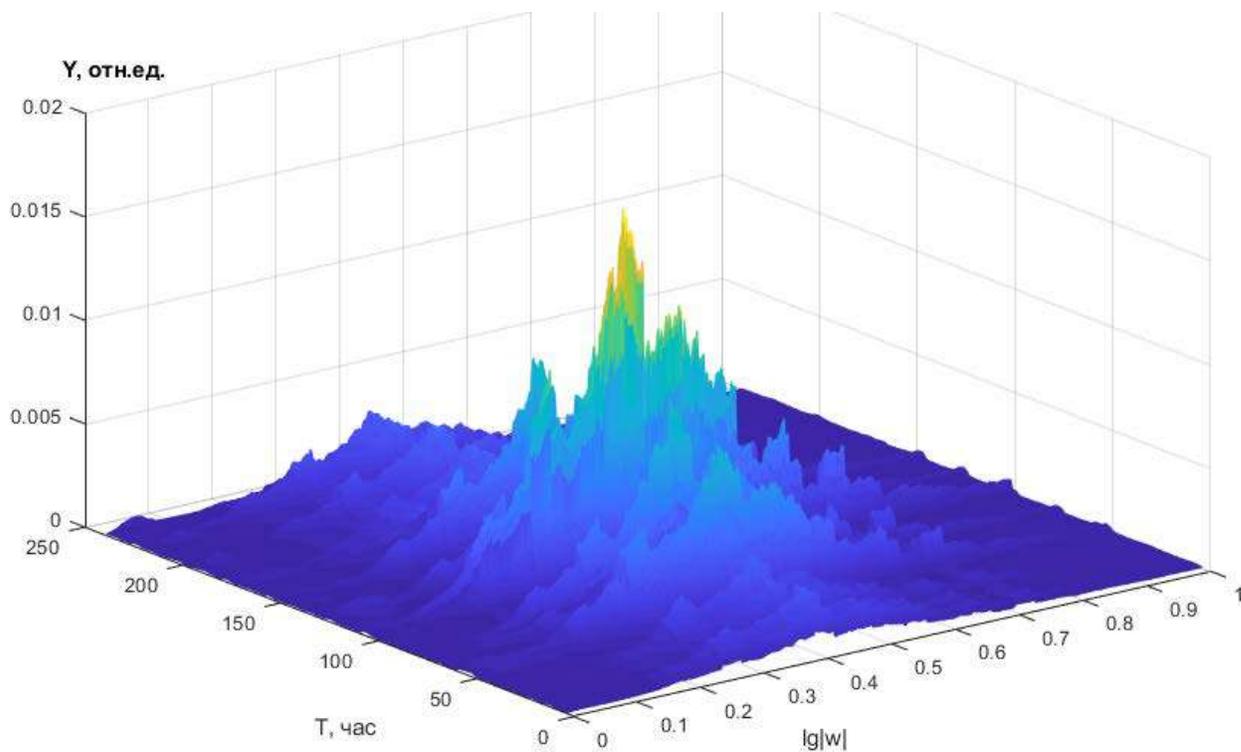


Рис. 14. Основные и дополнительные импедансы и фазовые кривые на пункте №21 Укок-2 в конце регистрации 07.09.2021.

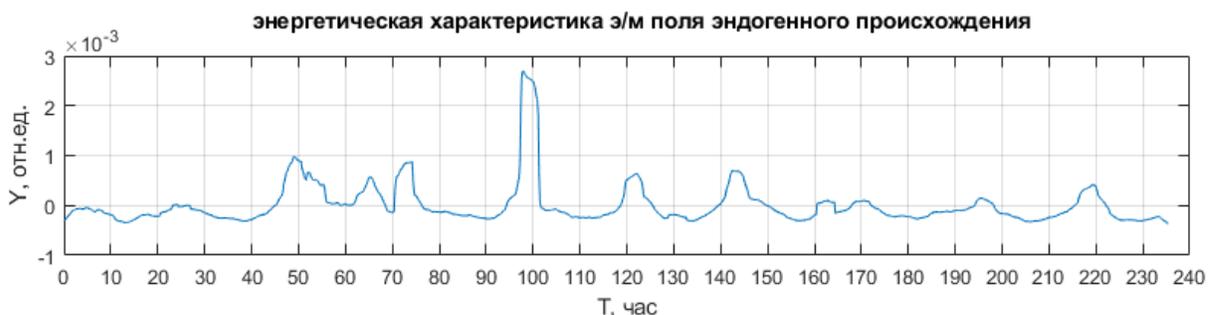


**Рис. 15.** Трехмерное распределение среднеамплитудных значений электромагнитного поля эндогенного происхождения в частотно-временной области ( $-6 < \lg(\omega) < 1$ ) для пункта № 21 профиля Укок-2 за период 25/08/2021 08:08:00 UTC до 04/09/2021 04:02:00 UTC.



**Рис. 16.** Трехмерное распределение среднеамплитудных значений электромагнитного поля эндогенного происхождения в частотно-временной области ( $0 < \lg(\omega) < 1$ ) для пункта № 21 профиля Укок-2 за период 25/08/2021 08:08:00 UTC до 04/09/2021 04:02:00 UTC.

Полученная энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения показана на рис. 17.



**Рис. 17.** Энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения для пункта № 21 профиля Укок-2.

### **5. Модификация алгоритмов и программной реализации с целью повышения вычислительной эффективности обработки и анализа длинных временных рядов полевых материалов сейсмо-электромагнитного мониторинга.**

Разработанные ранее в ходе выполнения проекта алгоритмы по оценке стационарности временных рядов данных, зарегистрированных градиентной сейсморегирующей установкой, позволили провести первичную оценку качества данных. С целью реализации следующего этапа обработки – спектрального анализа сейсмических данных, была разработана программа, объединяющая первичный анализ (оценка стационарности) и подготовку данных для спектрального анализа.

Для дальнейшего спектрального изучения регистрируемых сейсмических сигналов был применен подход, основанный на описании этих сигналов как шумоподобных. При этом был использован новый формализм описания шумоподобных сигналов без тренда, основанный на приведении к линейному инвариантному спектру, позволяющий обрабатывать 10-минутные временные отрезки в рамках единой схемы с неортогональным комбинированным анализом Фурье спектра сглаженных сигналов. Неортогональный комбинированный Фурье анализ сглаженных сигналов (НОКФАСС или NOCFASS) позволил извлечь инвариантный спектр из общего спектра Фурье, который содержит небольшое количество частот с линейным законом дисперсии  $\Omega_k = a \cdot k + b$ .

С помощью разработанной программной реализации проведена опытно-методическая обработка сейсмических данных, полученных в пункте режимного мониторинга Укок-2 (южный борт Кочкорской впадины, Тянь-Шань). Широкий набор сигналов с трендом был преобразован в набор бестрендовых последовательностей с помощью процедуры интегрирования. Полученный после преобразований спектр с исключенными высокочастотными компонентами рассматривался как инвариантный спектр, который содержит только основные низкочастотные моды. Результаты такой обработки дают возможность обнаружения различных случайных факторов, нарушающих поведение бестрендовых последовательностей и проявляющихся в виде фрактальности.

## **6. Подготовка научных публикаций по теме исследования.**

Подготовлены **12 научных публикаций** по теме исследования, из них: статей, индексируемых в БД Web of Science и Scopus – 2 опубликованы; материалов 2 - поданы и приняты к печати, индексируемые БД Web of Science и Scopus; в РИНЦ – 1 РИД, и 7 – материалов, трудов и тезисов докладов, индексируемых РИНЦ.

*Статьи в журналах, индексируемых в международной информационно-аналитической системе Web of Science и Scopus (2 ед.)*

1. Nigmatullin R.R., Rybin A.K., Nepeina K.S., Kaznacheev P.A. NOCFASS: Quantitative description of the seismic noise-like signals in the earthquake-prone areas // Measurement 2021, 185, 110020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110020>.

2. Matiukov V.E., Bataleva E.A. and Nepeina K.S. New options to study irreversible deformations in the Tien Shan lithosphere // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 773, Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior 30th September – 4th October 2019, Novosibirsk, Russian Federation. 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/773/1/012053>.

*РИД, индексируемый в российской информационно-аналитической системе РИНЦ (1 ед.)*

1. Казначеев П.А., Непеина К.С. Программа для оценки стационарности ряда сейсмоакустических данных, зарегистрированных трехкомпонентной градиентной установкой, и их подготовки для дальнейшей обработки / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613266 RU. Дата публикации 04.03.2021.

*Материалы докладов, индексируемые в российской информационно-аналитической системе РИНЦ (7 ед.)*

1. Непеина К. С. Связь изменчивости энергетической характеристики эндогенного поля с сейсмичностью (Чуйская область, Кыргызстан) // Двадцать вторая Уральская молодежная научная школа по геофизике : Сборник научных материалов, Пермь, 15–19 марта 2021 года. – Пермь: Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2021. – С. 91-95.

2. Непеина К.С., Валуйский А.Ю. Технологический подход разделения непрерывных данных магнитотеллурического зондирования для сейсмо-электромагнитных исследований // Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сб. материалов XIII Междунар. конф. молодых ученых и студентов. – Бишкек: НС РАН, 2021. – С. 159-167.

3. Александров П.Н., Непеина К.С. Постановка системы геофизических наблюдений для изучения современных геодинамических процессов // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский. 26 сентября–2 октября 2021 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 22-26.

4. Александров П.Н., Непеина К.С. Перспективы развития геофизического мониторинга для изучения современных геодинамических процессов // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов II всероссийской конференции с международным участием. 29-30 сентября 2021 г. Москва: ИТПЗ РАН, 2021. – С. 15-16.

5. Казначеев П.А., Непеина К.С., Александров П.Н. К методике анализа возможной связи лунно-солнечных приливов, активности эндогенного источника магнитотеллурического поля и величины сейсмоакустического сигнала в геодинамически активных областях // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Тез. докл. VIII Междунар. симпозиума, г. Бишкек, 28 июня – 2 июля 2021 г. - Бишкек: НС РАН, 2021. - С. 180.

6. Непейна К.С., Александров П. Н. Пассивный сейсмоэлектромагнитный мониторинг современных геодинамических процессов литосферы Северного Тянь-Шаня // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов : Тезисы докладов VIII Международного симпозиума, Бишкек, 28 июня – 02 2021 года. – Бишкек: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке, 2021. – С. 196.

7. Александров П. Н. К вопросу фазовых и групповых скоростей распространения физических полей // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей : Материалы всероссийской конференции с международным участием, Екатеринбург, 20–24 сентября 2021 года. – Екатеринбург: Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, 2021. – С. 9-12.

***Публикации, подготовленные и принятые к печати в 2021 году (2 ед.)***

1. Nereina K.S., Rybin A.K., Kaznacheev P.A. Maintenance process for the joint seismic-and-electromagnetic monitoring in low-ambient noise areas: the seismic gradient system // NRES 2021: II Международный научно-практический форум по природным ресурсам, окружающей среде и устойчивому развитию **IOP/Springer Proceedings**

2. Nereina K.S., Rybin A.K. The joint seismic-and-electromagnetic monitoring with electromagnetic field separation // NRES 2021: II Международный научно-практический форум по природным ресурсам, окружающей среде и устойчивому развитию **IOP/Springer Proceedings**

***Участие в научных мероприятиях по тематике Проекта за период, на который был предоставлен грант (13 ед.)***

1. Непейна К.С. 2021. Связь изменчивости энергетической характеристики эндогенного поля с сейсмичностью (Чуйская область, Кыргызстан) // *XXII Уральская молодежная научная школа по геофизике*. Россия, г. Пермь. 15.03.2021–19.03.2021. Устный доклад. Докладчик: Непейна К.С.

2. Валуйский А.Ю., Непейна К.С. Технологический подход разделения непрерывных данных магнитотеллурического зондирования для сейсмо-электромагнитных исследований // *XIII Международная конференция молодых ученых и студентов*. Кыргызстан, г. Бишкек. 28.04.2021-30.04.2021. Устный доклад. Докладчик: Непейна К.С.

3. Непейна К.С., Александров П.Н. Пассивный сейсмоэлектромагнитный мониторинг современных геодинамических процессов литосферы Северного Тянь-Шаня // *VIII Международный симпозиум*. Кыргызстан, г. Бишкек. 28.06.2021-02.06.2021. Устный доклад. Докладчик: Александров П.Н.

4. Казначеев П.А., Непейна К.С., Александров П.Н. К методике анализа возможной связи лунно-солнечных приливов, активности эндогенного источника магнитотеллурического поля и величины сейсмоакустического сигнала в геодинамически активных областях // *VIII Международный симпозиум*. Кыргызстан, г. Бишкек. 28.06.2021-02.06.2021. Устный доклад. Докладчик: Казначеев П.А.

5. Nereina K.S., Rybin A. K., Kaznacheev P. A. Maintenance process for the joint seismic-and-electromagnetic monitoring in low-ambient noise areas: the seismic gradient system // *NRES 2021: II Международный научно-практический форум по природным ресурсам, окружающей среде и устойчивому развитию*. Россия, г. Барнаул, 29.04.2021-30.04.2021. Устный доклад. Докладчик: Непейна К.С.

6. Nereina K.S., Rybin A. K. The joint seismic-and-electromagnetic monitoring with electromagnetic field separation // *NRES 2021: II Международный научно-практический форум*

по природным ресурсам, окружающей среде и устойчивому развитию. Россия, г. Барнаул, 29.04.2021-30.04.2021. Устный доклад. Докладчик: Непеина К.С.

7. Александров П.Н., Непеина К.С. Постановка системы геофизических наблюдений для изучения современных геодинамических процессов // *«Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов»* г. Петропавловск-Камчатский, 26.09.2021 – 02.10.2021. Устный доклад. Докладчик: Александров П.Н.

8. Александров П.Н., Непеина К.С. Перспективы развития геофизического мониторинга для изучения современных геодинамических процессов // *II Всероссийская научная конференция с международным участием "Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений"*. 29.09.2021-30.09.2021. Устный доклад. Докладчик: Александров П.Н.

9. Александров П.Н. Разделение магнитотеллурического поля по положению источников // *VIII Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021)*. г. Москва, 04.10.2021-09.10.2021. Устный доклад. Докладчик: Александров П.Н.

10. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Александров П.Н., Непеина К.С. Электромагнитные исследования современных геодинамических процессов литосферы областей внутриконтинентальной орогении, на примере Тянь-Шаня // *VIII Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021)*. г. Москва, 04.10.2021-09.10.2021. Устный доклад. Докладчик: Рыбин А.К.

11. Александров П.Н., Рыбин А.К. Феномен поля источников электромагнитной эмиссии в земле – эффект Доплера в проводящей среде // *VIII Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021)*. г. Москва, 04.10.2021-09.10.2021. Стендовый доклад. Докладчик: Александров П.Н.

12. Непеина К.С., Рыбин А.К., Александров П.Н., Казначеев П.А. Результаты изучения геофизических полей эндогенного происхождения на северном Тянь-Шане // *VIII Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021)*. г. Москва, 04.10.2021-09.10.2021. Стендовый доклад. Докладчик: Рыбин А.К.

13. Александров П. Н. К вопросу фазовых и групповых скоростей распространения физических полей // *Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей : Всероссийская конференция с международным участием*, Екатеринбург, 20–24 сентября 2021 года. – Екатеринбург: Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН. Устный доклад. Докладчик: Александров П. Н.

## **7. Государственная регистрация результатов интеллектуальной деятельности (РИД), полученных в ходе выполнения проекта.**

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019618606 Российская Федерация. Программа разделения электромагнитного поля по положению источников по данным магнитотеллурических зондирований: № 2019617693 : 02.07.2019 / П. Н. Александров, Е. А. Баталева; заявитель Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке (НС РАН).

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019618732 Российская Федерация. Программа для синхронной регистрации сигналов с многоканальной коммутацией на вход одиночного аналого-цифрового преобразователя : № 2019617685 : опубл.

04.07.2019 / П. А. Казначеев, К. С. Непеина; заявитель Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке (НС РАН).

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613266 Российская Федерация. Программа для оценки стационарности ряда сейсмоакустических данных, зарегистрированных трехкомпонентной градиентной установкой, и их подготовки для дальнейшей обработки : № 2021612102 : опубл. 04.03.2021 / П. А. Казначеев, К. С. Непеина; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019618936 Российская Федерация. Программа обработки данных регистрации сейсмических данных, зарегистрированных градиентной установкой : № 2019617930 : опубл. 08.07.2019 / П. Н. Александров, К. С. Непеина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке (НС РАН).

#### **8. Приложение 1. Модификация алгоритмов и программной реализации с целью повышения вычислительной эффективности обработки и анализа длинных временных рядов полевых материалов сейсмо-электромагнитного мониторинга.**

В Приложение 1 подробно рассмотрена методическая часть предлагаемой модификации алгоритмов и программ для обработки и анализа полевых записей сейсмоакустических сигналов, полученных с помощью градиентной установки, с использованием алгоритма неортогонального комбинированного Фурье анализа сглаженных сигналов. Также в Приложении приведены практические результаты обработки экспериментальных сейсмических данных, полученные с использованием разработанных программных средств.

**Примечание.** Полный текст данного раздела отчета с рисунками приведен в дополнительном pdf-файле, прикрепленном в системе КИАС к отчету.

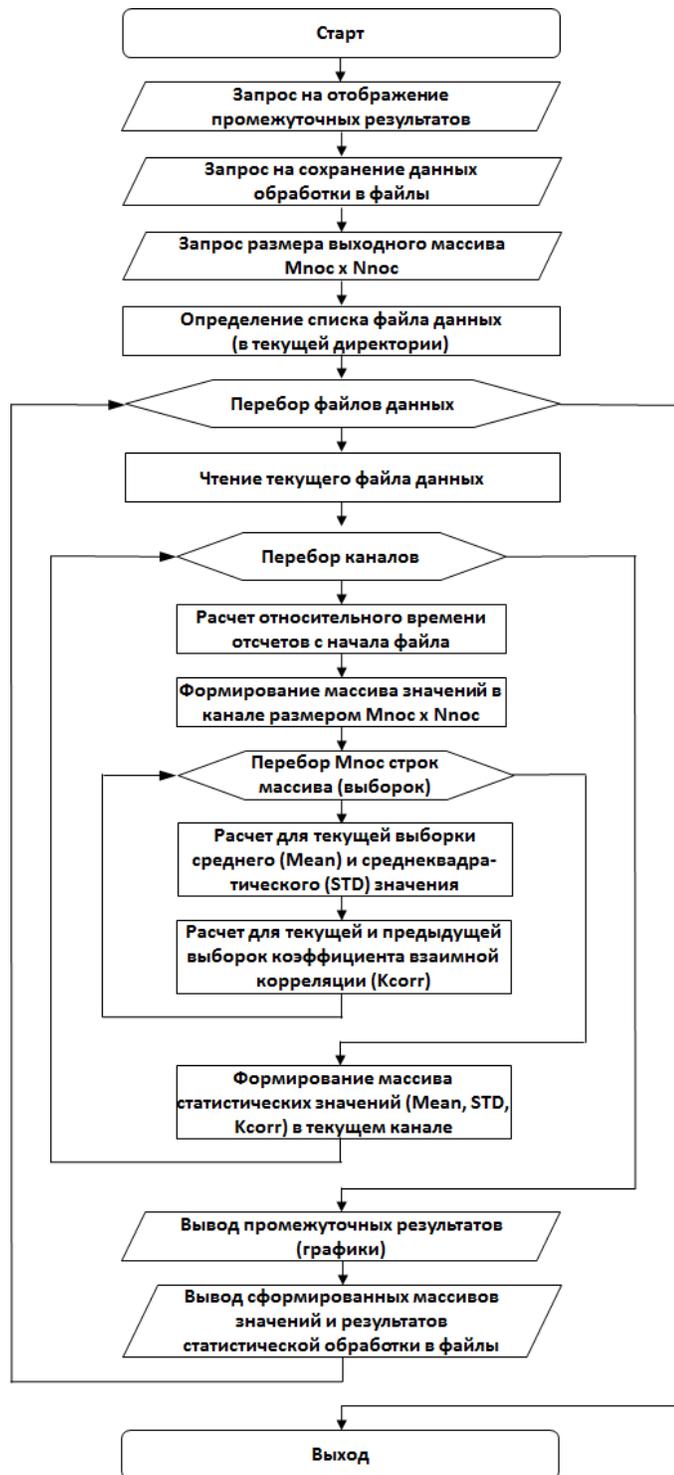
**Модификация алгоритмов и программной реализации с целью повышения вычислительной эффективности обработки и анализа длинных временных рядов полевых материалов сейсмо-электромагнитного мониторинга**

*Подготовка данных сейсмоакустического мониторинга для неортогонального комбинированного Фурье анализ сглаженных сигналов (НОКФАСС) и оценки качества временных рядов*

Разработанные ранее алгоритмы по оценке стационарности временных рядов данных, зарегистрированных градиентной сейсморегистрирующей установкой, позволили провести первичную оценку качества данных. Следующий этап заключался в спектральном анализе данных, чему посвящен следующий подраздел. Была разработана программа, объединяющая первичный анализ (оценка стационарности) и подготовку данных для спектрального анализа. [Казначеев, Непейна, 2021]. Особенностью входных данных для алгоритма спектрального анализа (неортогонального комбинированного Фурье анализ сглаженных сигналов - НОКФАСС) является их специфическая форма и требования к нормировке. Нормировка - приведение входных сигналов к относительным единицам от половины максимально возможного размаха сигнала – осуществлялась в программе регистрации данных. Формат одного блока входных данных для спектрального анализа представляет собой матрицу определенной размерности  $M_{noc} \times N_{noc}$ , единой для всех анализируемых блоков. С целью универсализации, в разработанной программе пользователь может самостоятельно вводить размерность матрицы. Программа формирует выходной массив, являющийся входными данными для спектрального анализа так, как это показано на рисунке 1. Блок-схема программы показана на рисунке 2.

$$A = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & \dots & x_{1,N_{noc}} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & \cdot & x_{2,N_{noc}} \\ x_{3,1} & x_{3,2} & x_{3,3} & \cdot & x_{3,N_{noc}} \\ \vdots & \cdot & \cdot & \ddots & \vdots \\ x_{M_{noc},1} & x_{M_{noc},2} & x_{M_{noc},3} & \dots & x_{M_{noc},N_{noc}} \end{pmatrix}$$

**Рисунок 1.** Порядок заполнения выходного массива (входного для последующего спектрального анализа) последовательно идущими во времени значениями отсчетов сигнала в одном канале (показано линией со стрелками).



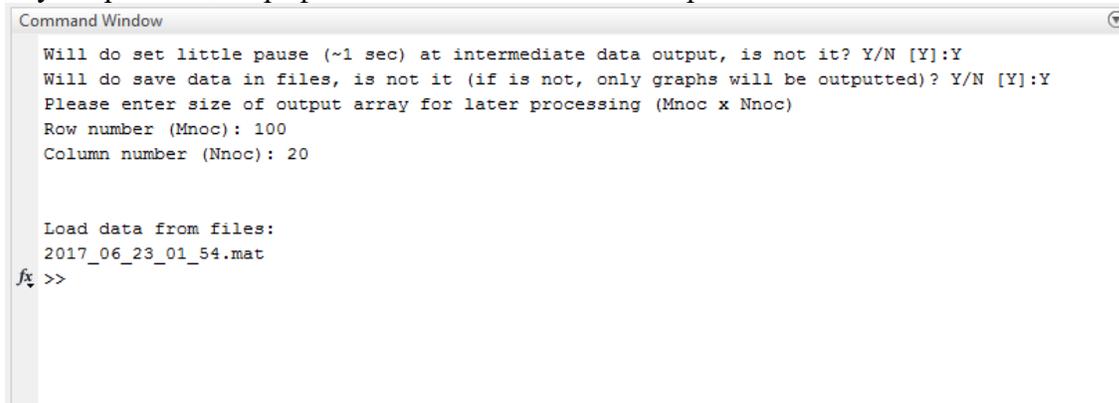
**Рисунок 2.** Упрощенная блок-схема программы по первичному анализу (оценка стационарности) зарегистрированных сейсмоакустических данных и их подготовке для спектрального анализа.

Основной функционал реализован в программной среде MatLab. Результаты работы выводятся на экран (результаты первичного анализа) и напрямую сохраняются в файлы

(результаты первичного анализа и входные данные для спектрального анализа). Программа состоит из двух модулей:

- Процедура “SASconvNOC.m” реализует весь основной функционал (загрузку зарегистрированных данных из файлов, их обработку и сохранение результатов обработки в файлы).
- Вспомогательная процедура “plotime.m” обеспечивает построение графиков для промежуточного вывода данных в виде графиков (визуализация для пользователя).

Работа с программой осуществляется следующим образом. Сначала через командную строку выводятся запросы к пользователю (рисунок 3). Первый запрос – на необходимость отображения промежуточных результатов; если пользователь соглашается, то устанавливается пауза при выводе графиков для возможности их прочтения.



```
Command Window
Will do set little pause (~1 sec) at intermediate data output, is not it? Y/N [Y]:Y
Will do save data in files, is not it (if is not, only graphs will be outputted)? Y/N [Y]:Y
Please enter size of output array for later processing (Mnoc x Nnoc)
Row number (Mnoc): 100
Column number (Nnoc): 20

Load data from files:
2017_06_23_01_54.mat
fx >>
```

**Рисунок 3.** Командная строка для ввода параметров программы.

Второй запрос – на необходимость вывода данных обработки в файлы; если пользователь не соглашается, то результаты обработки выводятся только в виде графиков на экране. Третий – на требуемый размер формируемого регулярного массива, количество строк Mnoc и количество столбцов Nnoc.

Далее производится определение списка файлов данных в текущей директории, где находится файл программы. Необходимо, чтобы файлы данных были заранее размещены в той же директории, где находится основной модуль программы “SASconvNOC.m”. После получения списка запускается цикл последовательного перебора файлов. Внутри цикла данные из текущего файла загружаются в промежуточную переменную.

Затем начинается цикл перебора всех каналов внутри текущего файла. Внутри цикла для текущего канала производится расчет относительного времени (относительно начала файла) с коррекцией значения сигнала и времени к регулярной временной сетке. Затем производится формирование выходного массива размером Mnoc x Nnoc для дальнейшей обработки в порядке, показанном на рисунке 1. После этого начинается цикл перебора строк массива для первичного анализа данных. Внутри цикла перебора строк массива формируется текущая выборка – текущая строка массива. Для текущей выборки рассчитывается статистические значения: среднее значение (Mean) и среднеквадратичное значение (STD), а также для текущей выборки рассчитывается коэффициент взаимной корреляции с предыдущей выборкой (для первой выборки значение не рассчитывается).

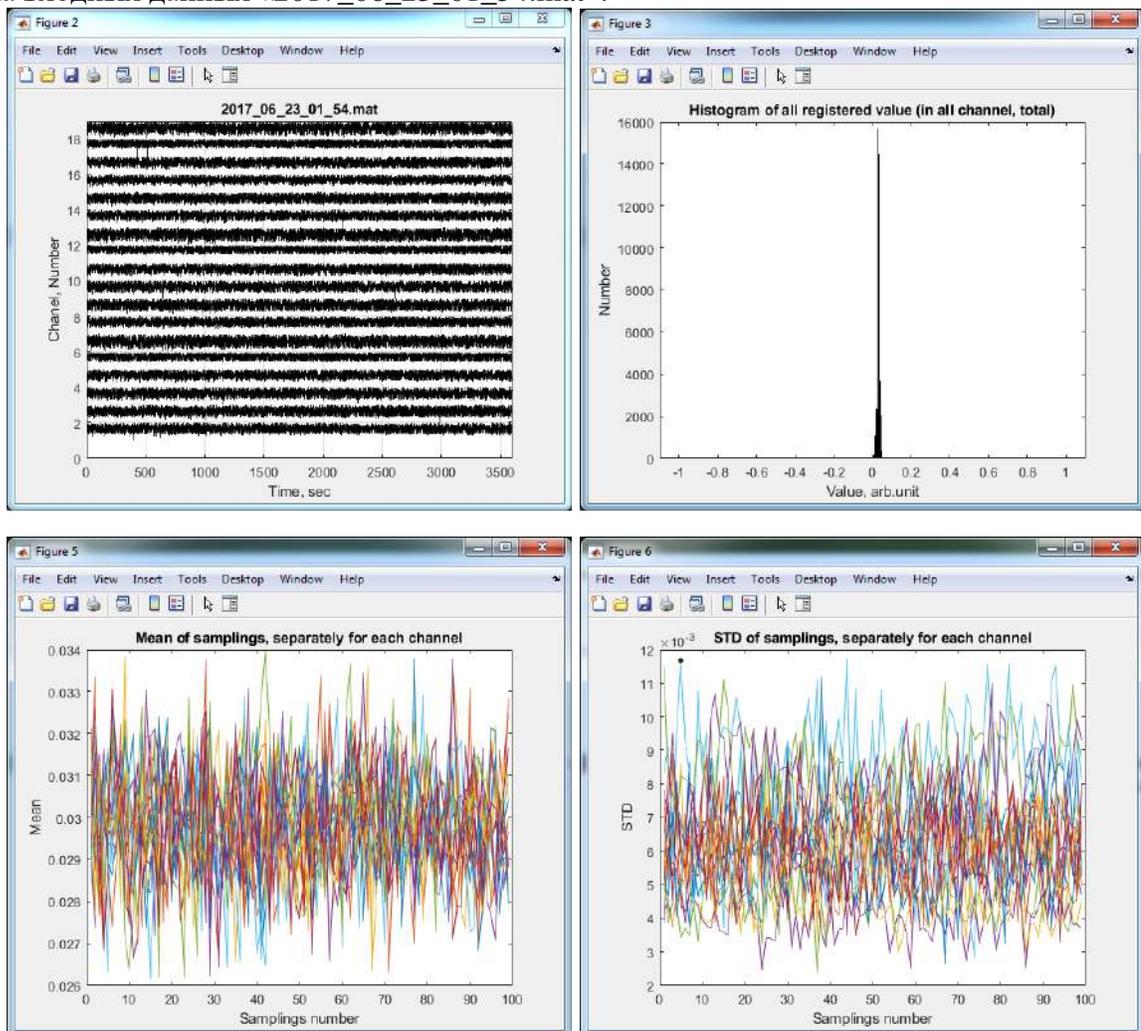
После окончания цикла перебора строк и цикла перебора каналов полученные статистические значения сохраняются в отдельных массивах для всех каналов сразу, т.е. массив с средним значением (Mean) размером Mnoc x 18, где 18 – число каналов, аналогично для STD и Kcorr.

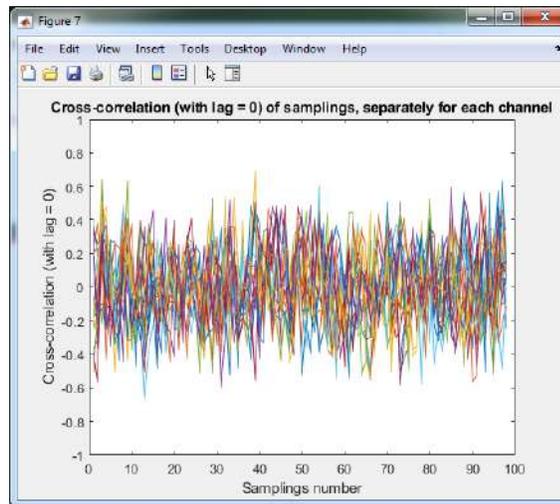
После обработки данных текущего файла производится вывод графиков промежуточных результатов (рисунок 4):

- исходные сигналы на одном графике друг под другом;
- гистограмма распределения значений сигналов;
- среднее значение сигнала в каждом канале для выборки сигнала, соответствующей одной строке формируемого выходного массива;
- то же для среднеквадратичного значения (СКО);
- коэффициент взаимной корреляции двух соседних выборок сигнала в одном канале.

Также производится вывод сформированных данных в файлы:

- 18 файлов таблиц Excel сформированных регулярных массивов зарегистрированных данных, заданного пользователем размера  $M_{\text{pos}} \times N_{\text{pos}}$  (один файл на каждый канал);
- 1 текстовый файл со всеми зарегистрированными значениями в последовательном порядке с указанием времени и канала регистрации;
- 3 файла таблиц Excel с результатами оценки стационарности (среднее Mean и среднеквадратичное STD значение по выборке, коэффициент взаимной корреляции  $K_{\text{corr}}$  соседних выборок). Список файлов представлен в таблице 1, для одного конкретного примера файла входных данных «2017\_06\_23\_01\_54.mat».





**Рисунок 4.** Выводимые промежуточные графические данные (подробнее см. в тексте)

**Таблица 1.** Список выводимых файлов

Имя файла *	Тип содержимого
2017_06_23_01_54.mat_ch1.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 1
2017_06_23_01_54.mat_ch10.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 10
2017_06_23_01_54.mat_ch11.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 11
2017_06_23_01_54.mat_ch12.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 12
2017_06_23_01_54.mat_ch13.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 13
2017_06_23_01_54.mat_ch14.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 14
2017_06_23_01_54.mat_ch15.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 15
2017_06_23_01_54.mat_ch16.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 16
2017_06_23_01_54.mat_ch17.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 17
2017_06_23_01_54.mat_ch18.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 18
2017_06_23_01_54.mat_ch2.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 2
2017_06_23_01_54.mat_ch3.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 3
2017_06_23_01_54.mat_ch4.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 4
2017_06_23_01_54.mat_ch5.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 5
2017_06_23_01_54.mat_ch6.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 6
2017_06_23_01_54.mat_ch7.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 7
2017_06_23_01_54.mat_ch8.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 8
2017_06_23_01_54.mat_ch9.xlsx	входные данные для спектрального анализа, канал 9
2017_06_23_01_54.mat_export.txt	исходные данные, переведенные в текстовый формат
2017_06_23_01_54.mat_stat_corr.xlsx	оценка скользящей корреляции, по каждому каналу
2017_06_23_01_54.mat_stat_mean.xlsx	оценка скользящего среднего, по каждому каналу
2017_06_23_01_54.mat_stat_std.xlsx	оценка скользящего СКО, по каждому каналу

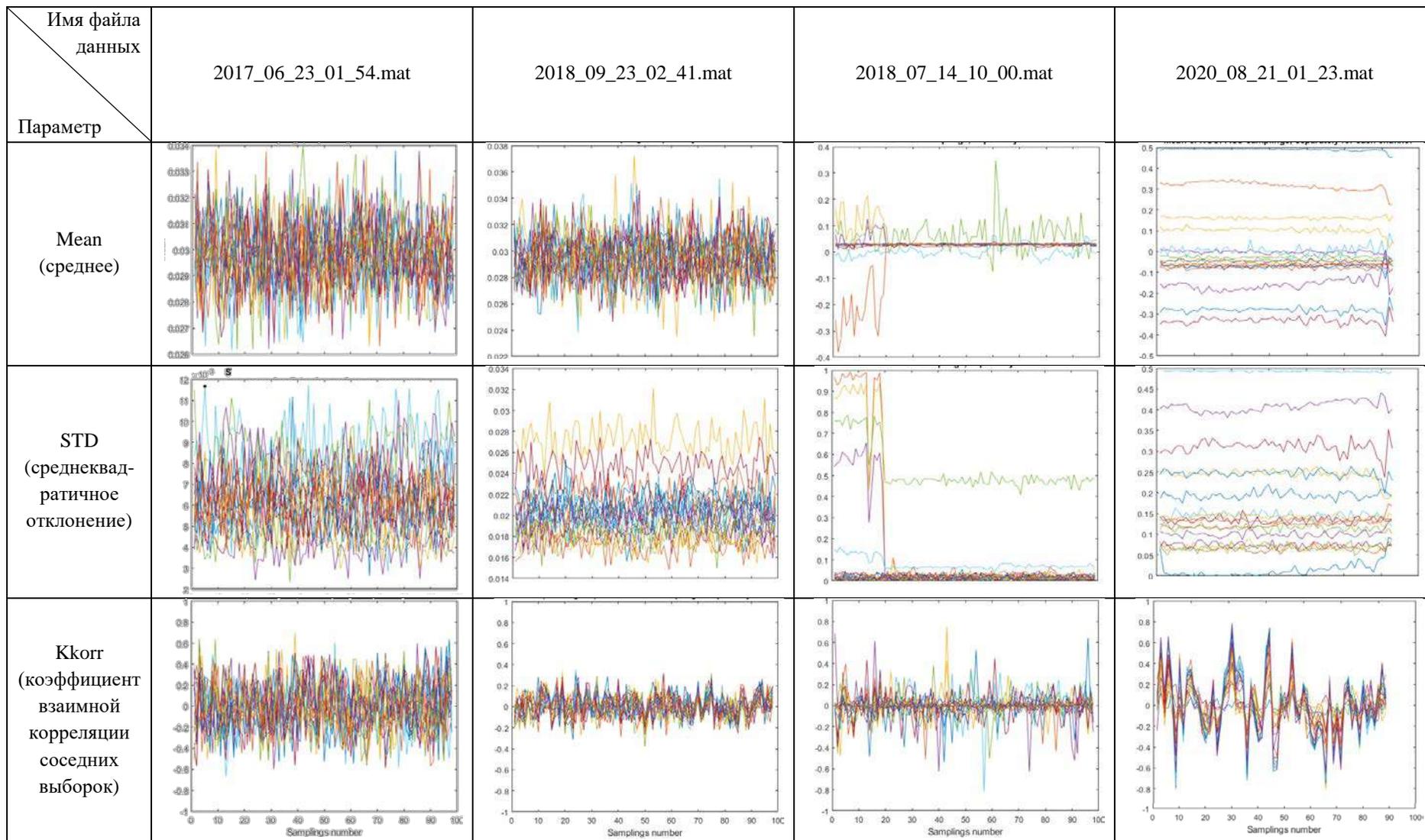
\* «2017\_06\_23\_01\_54.mat» – название примера исходного файла данных, используемое как префикс при формировании имен файлов

Первичный анализ данных через оценку стационарности позволил определить качество регистрируемых данных, которое определяется не только самим сеймоакустическим сигналом, но и режимом работы аппаратуры и её сбоями. Например, изменение среднего значения может означать временную нестабильность выходного напряжений в усилителях и

т.п. Увеличение корреляции между соседними выборками может говорить о наличии переменного квазигармонического сигнала, в том числе – сетевой помехи.

Пример сравнительного анализа стационарности нескольких фрагментов сигнала с этой целью показан в таблице 2. Приведены несколько характерных примеров данных: условия тихой обстановки («2017\_06\_23\_01\_54.mat» и «2018\_09\_23\_02\_41.mat» - ночное время, отсутствие явных соседствующих антропогенных помех, слабые вариации параметров), присутствие временной помехи («2018\_07\_14\_10\_00.mat», существенные непродолжительные вариации среднего и особенно СКО для нескольких каналов), нарушение работы аппаратуры («2020\_08\_21\_01\_23.mat», почти на всех каналах - постоянные и очень большие абсолютные значения средних и СКО, похожий характер вариаций корреляции).

**Таблица 2.** Сравнение результатов первичного анализа данных, зарегистрированных в разные моменты



***Неортогональный комбинированный Фурье анализ сглаженных сигналов (НОКФАСС):  
количественное описание сейсмических шумоподобных сигналов в сейсмоопасных  
районах***

Для дальнейшего изучения регистрируемых сейсмических сигналов был проведен спектральный анализ. Это отдельное исследование было посвящено возможностям описания этих сигналов как шумоподобных. В работе использован новый формализм описания шумоподобных сигналов без тренда, основанный на приведении к линейному инвариантному спектру, позволяющий обрабатывать 10-минутные временные отрезки в рамках единой схемы с неортогональным комбинированным анализом Фурье спектра сглаженных сигналов.

Неортогональный комбинированный Фурье анализ сглаженных сигналов (НОКФАСС или NOCFASS) помогает извлечь инвариантный спектр из общего спектра Фурье, который содержит небольшое количество частот с линейным законом дисперсии  $\Omega_k = a \cdot k + b$ . В исследовании использован новый метод обработки исходных данных о природных процессах, таких как сейсмический шум, измеренных на поверхности сейсмической градиентной установкой с геофонами. В качестве примера обработки выбраны данные за 14-16 июля 2018 г., полученные на пункте режимного мониторинга Укок-2, Кыргызстан (Тянь-Шань). Широкий набор сигналов с трендом был преобразован в набора бестрендовых последовательностей с помощью процедуры интегрирования. Полученный после преобразований спектр с исключенными высокочастотными компонентами рассматривался как инвариантный спектр, который содержит только основные низкочастотные моды. Результаты полезны для дальнейшего обнаружения различных случайных факторов, нарушающих поведение бестрендовых последовательностей и проявляющихся в виде фрактальности.

***Введение***

Для решения задачи исследования фрактальности сейсмического шума следует выделить основные методы, принятые в геофизике для обработки сейсмических сигналов, представимых в виде шумоподобных бестрендовых последовательностей. Наиболее распространенные существующие методы, рассматривающие сейсмический шум как бестрендовые колебания, приведены в Таблице 3.

**Таблица 3.** Наиболее распространенные методы обработки шумоподобных сейсмических колебаний/случайных флуктуаций

Метод	Ограничения	Сложности и недостатки	Область
Методы формирования луча (Beamforming) и методы антенн	Необходимость подбора оптимальных длин временных окон и порогового значения отношения сигнал/шум	Параметры местоположения для близлежащих источников для определенной пары источник – станция должны быть неизменны	Оценка энергии сигнала в зависимости от направления на источник
Кросс-корреляция (взаимная корреляция)	Использует базу данных идеальных шаблонов и пороговых значений сигнал/шум, их применимость требует отдельного исследования	Высокий коэффициент взаимной корреляции более 0.8 для повторяющихся событий	Извлечение информации о сигналах от сейсмических событий, «зашифрованных» в шуме
Функция Грина	Используются стандартный гауссовский распределенный случайный процесс и порог статистической проверки	Оценка с временными окнами и фильтрацией	Классификация сейсмического шума
Машинное обучение / Нейронные сети / инверсия методом наименьших квадратов	Предварительные оценки шума, построение множественных синтетических и реальных данных, параметры распределения, статистики шумовых значений	Показатели законов предсказания, подгонка нескольких экспоненциальных компонентов демпфирования, много разложений и итераций обучения	Мониторинг микросейсмических событий при ГРП или классификации волн по фазам
Вейвлет-преобразования	База данных вейвлетов, небольшая по сейсмическому шуму. Первоначальная оценка вейвлета должна быть подтверждена данными модели	Сложность подбора меры подгонки. Критерий выбора оптимального / идеального вейвлета неизвестен	Извлечение информации об амплитуде сигналов во временной и частотной областях
Спектральные методы с Фурье преобразованием	Следует (критично) определить весовые функции, а также опорные станции	Подбор плотностей вероятности по близости к опорной станции	Мониторинг микросейсмичности ( $M < 2$ ) в густонаселенном районе
Поиск доминирующей периодичности во времени	Долговременные ряды сопоставляются с наблюдаемыми вариациями микросейсмичности	Согласование с известными процессами, такими как лунно-солнечные приливы движения планет	Доминирующие медленные низкочастотные процессы

При анализе слабых вариаций сейсмического шума из всех перечисленных выше методов чаще всего обращаются к поиску доминирующего периода колебаний, потому что исследователи освобождены от поиска модели свертки начального сигнала. Рассматривая пример, где существует суточный ход уровня средней амплитуды сейсмического шума (включая землетрясения), как на Гармском полигоне (Южный Тянь-Шань, Таджикистан), можно найти сильную периодичность во времени [Sidorin, 2009]. Такое же явление было обнаружено и в других сейсмоопасных районах: в Японии, в США, на Тянь-Шане. Вариации уровня сейсмического шума могут быть оправданы процессами транспрессии Альпийско-Гималайского пояса и поверхностными деформациями. Однако при стандартной обработке его также пытаются очистить от всех других известных возмущений: таких как влияние ветра, колебания температуры, лунно-солнечные приливы и т. д.

Кроме того, влияние приливных деформаций на эти вариации изучается с середины 20 века, при этом был реализован определенный повторяющийся естественный эксперимент по периодическим изменениям в связи с вариациями геофизических полей в пунктах непрерывного мониторинга на различных геодинамических полигонах. Продолжительность записей наблюдений до сих пор остается дискуссионной. С одной стороны, «эксперименты показывают, что минимальная типичная продолжительность зарождения землетрясений в системе разломов Сан-Андреас составляет  $\approx 1$  год» [Beeler, Lockner, 2003]. Однако, напротив, в [Sidorin, 2011] автор обнаружил, что при исследовании сейсмического шума в Греции существует 15-минутная периодичность с доминирующей составляющей с периодом  $T = 0.25$  ч. «Максимумы числа землетрясений концентрируются в окрестности значений текущего времени  $t$ , отсчитываемого с начала часа, равного  $t = 0$  (60), 15, 30 и 45 мин» [Sidorin, 2011]. Возможно, стоит проанализировать сопоставимые измерения по длительности. В нашем случае берутся 10-минутные дискретизированные последовательности входных сигналов.

Матрицу вида (рисунок 5) с 10-минутными отрезками записи будем называть  $M$ , где каждый столбец есть минутная запись датчика. Столбец будет состоять из 200 строк-ячеек с шагом дискретизации 0.3 с. Таким образом матрица для одного дня  $N \times M$  ( $N=1440$ ,  $M=200$ ).

2	0	0.029557	0.029457	0.030057	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
3	0.3	0.029801	0.029701	0.030301	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
4	0.6	0.018952	0.018852	0.019452	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
5	0.9	0.029221	0.029121	0.029721	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
6	1.2	0.029129	0.029029	0.029629	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
7	1.5	0.028916	0.028816	0.029416	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
8	1.8	0.028626	0.028526	0.029126	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
9	2.1	0.029053	0.028953	0.029553	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
10	2.4	0.028733	0.028633	0.029233	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
11	2.7	0.027771	0.027671	0.028271	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
12	3	0.027787	0.027687	0.028287	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
13	3.3	0.028588	0.028488	0.029088	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
14	3.6	0.028693	0.028593	0.029193	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
15	3.9	0.028798	0.028698	0.029298	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
16	4.2	0.028903	0.028803	0.029403	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
17	4.5	0.029007	0.028907	0.029507	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
18	4.8	0.029112	0.029012	0.029612	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
19	5.1	0.029217	0.029117	0.029717	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
20	5.4	0.029322	0.029222	0.029822	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
21	5.7	0.029427	0.029327	0.029927	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
22	6	0.028533	0.028433	0.029033	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Рисунок 5. Конечный вид матрицы значений для исследования фрактального шума.

Целью исследования является установление наличия фрактальности в пассивной сейсмической записи. До этого было доказано, что в записи существует компонента, связанная с активизацией эндогенных источников упругих волн, формирующих сейсмоакустическую эмиссию. Природа таких источников обусловлена процессами разрушения горных пород в литосфере Земли. Практические примеры представлены по экспериментам, проведенным на Тянь-Шане. Этот регион характеризуется активным проявлением современных геодинамических процессов [Киссин, 1997; Bataleva et al., 2013; Баталев, 2014; Непейна и др., 2019; Bataleva, 2019; Rybin et al., 2020].

Для исследования используются датчики скорости смещения GS-20DX фирмы Geospace (низкочастотные сейсмические датчики). Измерительное устройство представляет собой три геофона на одной посадочной площадке. Градиентная установка состоит из 6 таких устройств. Для целей исследования поведения шумов (на фрактальность) используется вертикальная компонента скорости смещения ( $S_z$ ) в сейсмическом поле в самой нижней точке наблюдения, наименее подверженная ветровому влиянию. Шаг дискретизации определялся регистрирующей аппаратурой (АЦП) и был равен 0.3 с [Kaznacheev et al., 2019; Казначеев, Непейна, 2019]. На вход подаются исходные обработке (без фильтрации) данные.

### *Данные и методы*

Научная станция РАН имеет сеть пунктов мониторинга Бишкекского геодинамического полигона (БГП) на Северном Тянь-Шане [Research station site. Bishkek Geodynamic Proving Ground, 2010]. Этот регион является сейсмоопасным и характеризуется активным проявлением современных геодинамических процессов. Для целей эксперимента выбрана точку мониторинга Укок-2 в Кочкорской впадине Кыргызского Тянь-Шаня. Здесь происходят сильные землетрясения: например, 25 декабря 2006 г. (20:01:54 UTC с магнитудой 5.5); 18 апреля 2020 г. (11:24:44 UTC с магнитудой 4.2, местоположение 42.330° N, 75.777° E). Геологическое описание района хорошо описано в работе [Przhiyalgovskii et al., 2018]. Представленные данные получены в результате экспериментов, проведенных с 14 июля 2018 г. (00:00:00 GMT + 6) по 16 июля 2018 г. (23:59:59 GMT + 6). НОКФАСС-разложение позволяет представить широкий класс случайных сигналов, имеющих мультисоставный спектр в виде следующего разложения:

$$y(t_n) \equiv y_n \cong F(t_n) = A_0 + \sum_{k=0}^{K-1} [Ac_k \cos(\Omega_k t_n) + As_k \sin(\Omega_k t_n)] \equiv$$

$$\equiv A_0 + \sum_{k=0}^{K-1} [Amd_k \cos(\Omega_k t_n - \varphi_k)],$$

$$Amd_k = \sqrt{Ac_k^2 + As_k^2}, \varphi_k = \tan^{-1} \left( \frac{As_k}{Ac_k} \right),$$

$$t_n = t_0 + \left( \frac{n}{N-1} \right) \Delta t, \Delta t = t_{N-1} - t_0, n = 0, 1, \dots, N-1.$$

где  $A_0, Ac_k, As_k$  ( $k=0, 1, \dots, K-1$ ) - искомые амплитуды разложения заданного отрезка ряда,  $\Omega_k$  ( $k = 0, 1, \dots, K-1$ ) - закон дисперсии.

Здесь  $\Omega_k$  содержит неизвестный закон дисперсии, не совпадающий с  $\Omega_k = a\omega_k$  ( $a = 2\pi / T$ ), который используется в обычном преобразовании Фурье.

Неизвестные коэффициенты  $Ac_k, As_k$  легко найти с помощью линейного метода наименьших квадратов (LLSM). Чтобы подробно разобраться, предположим, что неизвестный сигнал  $y(t_n)$  представляет собой линейную комбинацию мод

$$y(t_n) = \sum_{k=1}^K Md_k(t_n), \quad Md_k(t_n) = A_k \exp(i(\omega_k t_n - \phi_k)).$$

Анализ имеющихся данных, взятых из разных источников, подтверждает поведение приведенного спектра  $\Omega_k$ , представленного в виде прямой  $\Omega_k = a \cdot k + b$ , что облегчает цели прогнозирования данного сигнала, находящегося за пределами начального интервала. Пределы этого спектра ( $\omega_0, \Omega_{Nc}$ ) можно скорректировать с помощью NAFASS-подхода [Nigmatullin, Gubaidullin, 2018], использующего исходную итерационную процедуру. Наконец, можно сформулировать задачу подбора многопериодических сигналов, полученных из бестрендовых последовательностей путем интегрирования:

**Шаг 1.** Расчет полного спектра для всех доступных  $m$  из интервала  $(0, N-1)$  вместе с полным частотным диапазоном.

**Шаг 2.** Вычисление допустимого диапазона  $m$  и предельного значения  $Nc$ .

**Шаг 3.** Расчет редуцированного / приведенного спектра, принадлежащего диапазону

$$\omega_0 \cong \frac{2\pi}{Range(t)} < \Omega_k < \Omega_{Nc}, \text{ и набор основных мод } f_k(t_n) = \{\cos(\Omega_k t_n), \sin(\Omega_k t_n)\}.$$

**Шаг 4.** Подгонка заданного сигнала  $y(t_n)$  с помощью метода наименьших квадратов и вычисление истинного амплитудно-частотного спектра (АЧС) -  $Amd_k(\Omega_k)$  and  $\phi_k(\Omega_k)$  по отношению к найденному приведенному спектру  $\Omega_k$ .

Приведенный спектр достигается благодаря свойству  $N$  (количество точек данных)  $\gg K$  (количество мод, описываемых законом дисперсии  $\Omega_k$ ). Самое интересное свойство этого спектра - его универсальность. Он может соответствовать не только заданному сигналу  $y(t_n)$ ; это позволяет уместить весь набор сигналов, заданных в виде интегрированных векторов  $Jy_m(t_n)$  ( $m=1,2,\dots,M$ ), которые получаются из исходной прямоугольной матрицы  $N \times M$  и даже больше.

Каждый канал градиентной установки записывается отдельно. Конфигурация каналов записана в файле NNN.m. Для эксперимента Укок-2 (2018 г.) конфигурация следующая (где под цифрами имеются ввиду номера каналов):

$E_x = [1, 10, 4, 7, 13, 16]$ ; %Укок2 – горизонтальная компонента N-S

$E_y = [2, 11, 5, 8, 14, 17]$ ; %Укок2 - горизонтальная компонента E-W

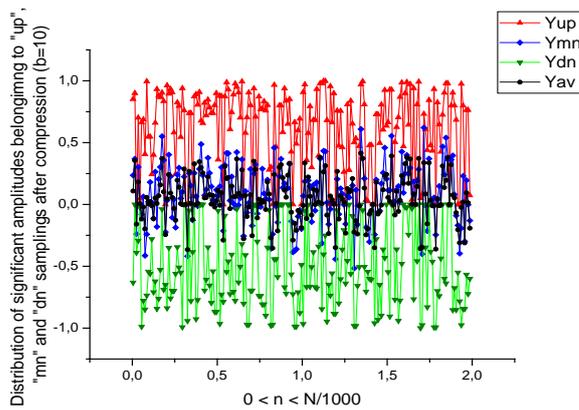
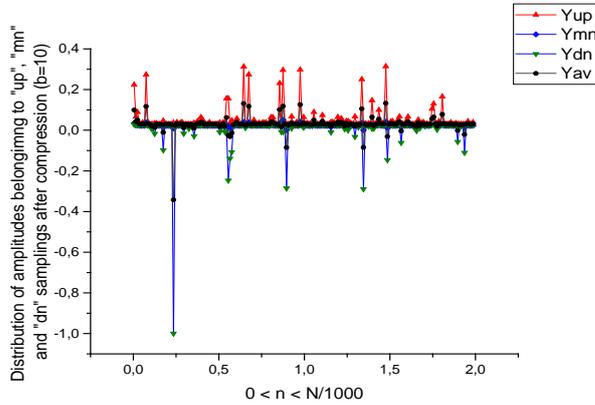
$E_z = [3, 12, 6, 9, 15, 18]$ ; %Укок2 – вертикальная компонента Z.

Данные, зарегистрированные сейсмической градиентной установкой, записываются в формате \*.mat (размера  $\approx 1.5$ кВ). Файлы представляют собой матрицу со числовыми значениями вида (рисунок 6) и преобразуются для НОКФАСС-анализа программой первичной обработки зарегистрированных данных согласно предыдущему подразделу.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2018	7	9	20	2	53.3900	0.0299	2018	7	9	20	2	53.7030
2	2018	7	9	20	2	53.4060	0.0291	2018	7	9	20	2	53.7180
3	2018	7	9	20	2	53.4210	0.0278	2018	7	9	20	2	53.7340
4	2018	7	9	20	2	53.4370	0.0288	2018	7	9	20	2	53.7500
5	2018	7	9	20	2	53.4530	0.0282	2018	7	9	20	2	53.7650
6	2018	7	9	20	2	53.4680	0.0288	2018	7	9	20	2	53.7810
7	2018	7	9	20	2	53.4840	0.0323	2018	7	9	20	2	53.7960
8	2018	7	9	20	2	53.5000	0.0336	2018	7	9	20	2	53.8120
9	2018	7	9	20	2	53.5150	0.0293	2018	7	9	20	2	53.8280

**Рисунок 6.** Общий вид файла данных, зарегистрированных градиентной установкой с 18 каналами.

Исходные данные для НОКФАСС-анализа представлены в виде двух прямоугольных матриц. Первая -  $M_1 = (N = 2000) \times (M = 148)$ , вторая -  $M_2 = (N = 2000) \times (M = 211)$ . В нашем случае  $N = 2000$ , потому что были выбраны 10-минутные отрезки последовательности. Значения последовательности представляют собой амплитуды сейсмических колебаний (нормированные на диапазон регистрации), зарегистрированные геофоном (каналом сейсмической градиентной установки), выбранного случайным образом. Первая матрица  $M_1$  соответствует флуктуациям сигнала малой амплитуды, а  $M_2$  - флуктуациям сигнала большой амплитуды со значительными отклонениями от среднего значения (рисунок 7).

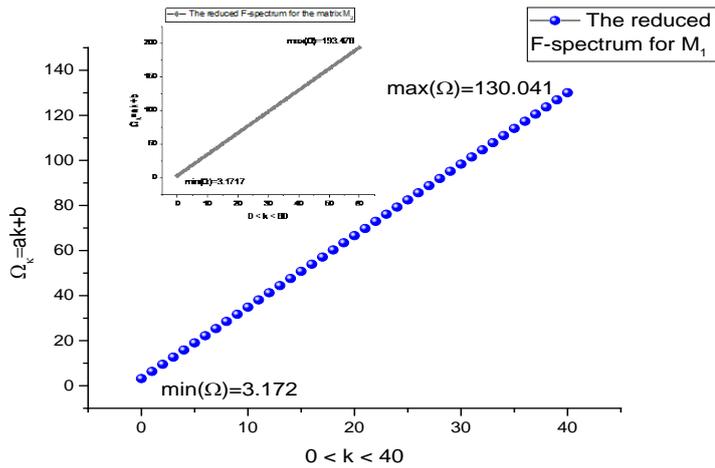


a

b

**Рисунок 7.** Результаты процедуры сведения к трем точкам экстремумов для значимых амплитуд для матриц:  $M_1$  (a) и  $M_2$  (b). Значение параметра сжатия  $b = 10$ . Кривые  $Yup(t_n)$ ,  $Ymn(t_n)$ ,  $Ydn(t_n)$  - демонстрируют распределение «максимальной», «средней» и «минимальной» точек соответственно. Исходная кривая и кривая  $Yav(t_n) = (Yup(t_n) + Ymn(t_n) + Ydn(t_n))/3$  сильно коррелируют друг с другом, коэффициент корреляции Пирсона равен 0.95-0.99.

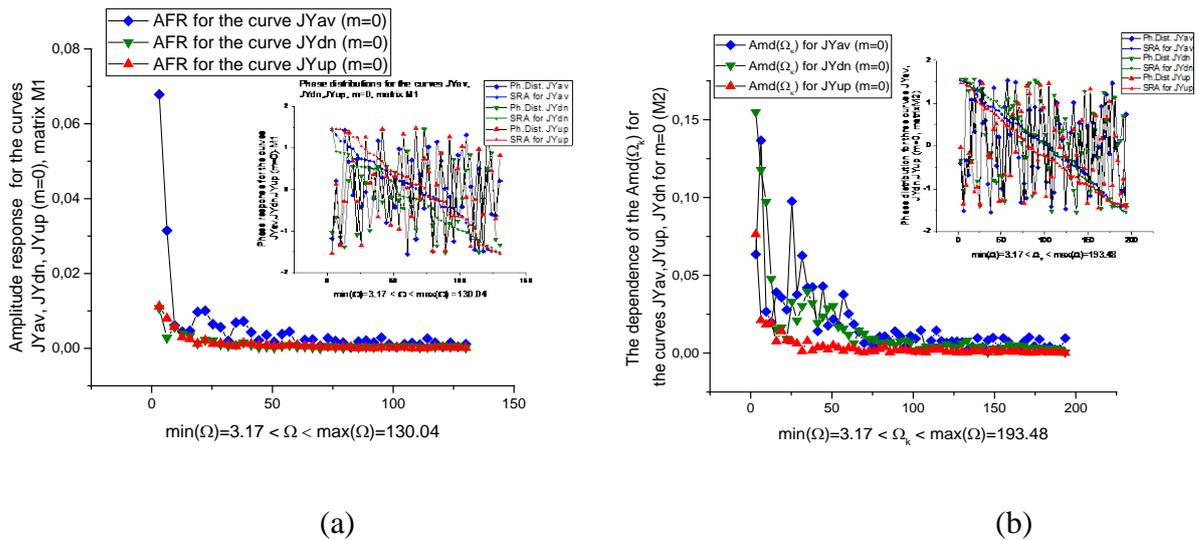
Для ускорения следующей процедуры подвергаем эти исходные данные редуцирующей процедуре, содержащей три точки экстремумов. Как показано в работах [Nigmatullin et al., 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2017, 2020], с помощью этой процедуры можно получить три подобные последовательности. Для этого необходимо выбрать из данной небольшой последовательности, содержащей  $b$  точек данных, только три статистически значимых точки  $b_{max}$ ,  $b_{min}$ ,  $b_{mean}$ . Эти три точки относительно сохраняют свои значения при  $(b)!$  перестановках. В итоге получаем инвариантный спектр (рисунок 8).



**Рисунок 8.** На этом рисунке показаны приведенные Фурье-спектры, полученные для обоих случаев  $M_{1,2}$ . Как видно из сравнения этих спектров, основное различие между ними заключается в их максимальных значениях  $\max(\Omega)=130.041$  ( $M_1$ ) и  $\max(\Omega)=193.476$  ( $M_2$ ). Фактически, эти приведенные спектры можно рассматривать как специфические инвариантные спектры, которые позволяют получить широкий набор интегральных кривых, полученных из исходных матриц  $M_{1,2}$ .

### Результаты анализа

Фактически, эти два участка частот с почти равными минимальными значениями ( $\min(\Omega)=2\pi/2\approx 3.17$ ) и  $\max(\Omega)=130.04$  (для набора интегральных кривых, происходящих от матрицы  $M_1$ ) и  $193.48$  (для матрицы  $M_2$ )) позволяют уместить широкий набор интегральных кривых  $JYup_m(t_n)$ ,  $JYdn_m(t_n)$ ,  $JYmn_m(t_n)$ ,  $JYav_m(t_n)$ , образующих 4 матрицы с количеством столбцов  $M=148$  (для  $M_1$ ) и  $M=211$  ( $M_2$ ). Поскольку затруднительно показать соответствие всех наборов кривых, поэтому можно показать аппроксимацию трех выбранных кривых  $JYup_m(t_n)$ ,  $JYdn_m(t_n)$ ,  $JYav_m(t_n)$ , соответствующих только предельным случаям ( $m=0$  and  $M=148$  ( $M_1$ ),  $211$  ( $M_2$ )), см. рисунок 9.



**Рисунок 9.** Амплитудно-частотный спектр (AFR) для трех кривых при предельном значении  $m=0$  (матрицы  $M_1$  (a) и  $M_2$ (b)). Очевидно, поведение модуля амплитуды представлено спадающими кривыми, в то время как фазовые характеристики (показанные на маленьких рисунках) представлены случайными однородными распределениями,

поскольку последовательности ранжированных амплитуд (SRA) близки к прямым отрезкам.

### ***Выводы***

Представлены результаты первого этапа рассмотрения случайных флуктуаций на основе записей сейсмической градиентной установки. Без применения фильтров различного типа и без потери исходных данных в низкочастотной области становится возможным количественно описать массив данных, охватывающий несколько дней, например, данных трехдневных записей (с 14 июля 2018 г. (00:00:00 GMT+6) до 16 июля 2018 г. (23:59:59 GMT+6)) в точке мониторинга Укок-2. Применение NOCFASS-метода позволяет «увидеть» в хаотических распределениях тренда желаемый закон дисперсии, применяемый для описания рассчитанных частот. Найденный закон дисперсии характеризуется довольно необычным для высокочастотного распределения (шума) участком – прямой линией.

Фазовые характеристики амплитудно-частотного спектра этих трех кривых представлены случайными равномерными распределениями. Последовательности ранжированных амплитуд (SRA) сохраняют близость к сегментам, где они близки к прямым линиям. В начале записи функция дисперсии индицирует, что среда (геосистема) имеет потенциальную энергию. За три дня наблюдений произошло три местных землетрясения. После этого вся система теряет свою потенциальную энергию (при  $\Omega > 100$ ), а амплитуды становятся небольшими или близки к нулевым.

Сложный процесс деформации, сопровождающийся в том числе и землетрясениями, формируется за счет разрушения геологической среды под воздействием тектонических напряжений, ионосферных возмущений, колебаний температуры, закачки флюида в породу и других факторов. Результаты данного исследования могут помочь в предоставлении дополнительной полезной информации для характеристики «скрытых» геодинамических процессов Тянь-Шаня. Результаты могут служить достаточно сильным аргументом в пользу дальнейшего разложения шумоподобных сейсмических колебаний. Гипотеза о механизме возникновения шумоподобной последовательности с некоторой перегруппировкой шума характеризует периодичность в процессе подготовки землетрясения.

Использование редуцированной/приведенной фрактальной модели на основе NOCFASS-метода поможет избежать обширных вычислений с использованием стандартных методов поиска сигналов и напрямую построить количественное описание коротких фоновых сейсмических шумоподобных записей в терминах общего набора рассчитанных подгоночных параметров без применения модели распределения случайных флуктуаций/шума. Кроме того, важную роль играет возможность использования NOCFASS-метода для сжатия зарегистрированных шумоподобных сигналов.

### ***Список литературы:***

Баталев В.Ю. Структура и состояние вещества литосферы Центрального Тянь-Шаня (по данным глубинных магнитотеллурических зондирований): дисс. ... д. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2014. 282 с.

Казначеев П.А., Непеина К.С. Программа для оценки стационарности ряда сейсмоакустических данных, зарегистрированных трехкомпонентной градиентной установкой, и их подготовки для дальнейшей обработки // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021613266, 04.03.2021. Заявка № 2021612102 от 16.02.2021.

Казначеев П.А., Непейна К.С. Программа для синхронной регистрации сигналов с многоканальной коммутацией на вход одиночного аналого-цифрового преобразователя // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019618732, 04.07.2019. Заявка № 2019617685 от 25.06.2019.

Киссин И.Г., Рузайкин А.И. Соотношение между сейсмоактивными и электропроводящими зонами в земной коре Киргизского Тянь-Шаня // Физика Земли, 1997, т. 33, № 1, с. 21-29.

Непейна К.С., Казначеев П.А., Александров П.Н. Сейсмический мониторинг современных геодинамических процессов с использованием градиентной установки // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2019, т. 44, № 4, с. 84–92. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-4-44-84-92>.

Bataleva E. On the question of the relationship of variations in geophysical fields, lunar-solar tidal effects and seismic events // E3S Web Conf. 2019, vol. 127, art. ID: 02019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912702019>.

Bataleva E.A., Batalev V.Y., Rybin A.K. On the question of the interrelation between variations in crustal electrical conductivity and geodynamical processes // Izv. Phys. Solid Earth, 2013, vol. 49, p. 402–410. <https://doi.org/10.1134/S1069351313030038>.

Beeler N.M., Lockner D.A. Why earthquakes correlate weakly with the solid Earth tides: Effects of periodic stress on the rate and probability of earthquake occurrence // J. Geophys. Res. 2003, vol. 108, iss. B8, art. ID: 2391. <https://doi.org/10.1029/2001JB001518>.

Kaznacheev P.A., Matiukov V.E., Aleksandrov P.N., Nepeina K.S. Development of a Three-Axis Gradient System for Seismoacoustic Data Acquisition in Geodynamically Active Regions // Seism. Instruments, 2019, vol. 55, p. 535–543. <https://doi.org/10.3103/S0747923919050062>.

Nigmatullin R.R., Gubaidullin I.A. NAFASS: Fluctuation spectroscopy and the Prony spectrum for description of multi-frequency signals in complex systems, Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 2018, vol. 56, p. 252–269. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.08.009>.

Nigmatullin R.R., Lino P., Maione G. New Digital Signal Processing Methods. – Cham: Springer International Publishing, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-45359-6>.

Nigmatullin R.R., Maione G., Lino P., Saponaro F., Zhang W. The general theory of the Quasi-reproducible experiments: How to describe the measured data of complex systems? // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul., 2017, vol. 42, p. 324–341. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2016.05.019>.

Nigmatullin R.R., Striccoli D., Boggia G., Ceglie C. A novel approach for characterizing multimedia 3D video streams by means of quasiperiodic processes // Signal, Image Video Process. 2016, vol. 10, p. 1113–1118. <https://doi.org/10.1007/s11760-016-0866-9>.

Nigmatullin R.R., Toboev V.A. Non-Orthogonal Amplitude-Frequency Analysis of the Smoothed Signals(NAFASS): Dynamics and the Fine Structure of the Sunspots // J. Appl. Nonlinear Dyn. 2015a, vol. 4, p. 67–80. <https://doi.org/10.5890/JAND.2015.03.006>.

Nigmatullin R.R., Toboev V.A., Lino P., Maione G. Reduced fractal model for quantitative analysis of averaged micromotions in mesoscale: Characterization of blow-like signals // Chaos, Solitons & Fractals. 2015b, vol. 76, p. 166–181. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2015.03.022>.

Nigmatullin R.R., Zhang W. NAFASS in action: How to control randomness? // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul., 2013, vol. 18, p. 547–558. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2012.07.008>.

Przhiyalgovskii E.S., Lavrushina E.V., Batalev V.Y., Bataleva E.A., Leonov M.G., Rybin A.K. Structure of the basement surface and sediments in the Kochkor basin (Tien Shan): geological and geophysical evidence // Russ. Geol. Geophys. 2018, vol. 59, p. 335–350. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.09.003>.

Research station site (2010). Bishkek Geodynamic Proving Ground. Available online at [http://www.gdirc.kg/en/index.php?option=com\\_content&view=article&id=46&Itemid=65](http://www.gdirc.kg/en/index.php?option=com_content&view=article&id=46&Itemid=65); 2010 [accessed 01 November 2021].

Rybin A.K., Bataleva E.A., Nepeina K.S., Kaznacheev P.A., Matiukov V.E., Aleksandrov P.N. Definition of the Seismic Field of the Underground Sources in the Ambient Seismic Noise in the Tien Shan Region Using a Three-Component Gradient System // J. Earth Sci., 2020, vol. 31, p. 988–992. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1327-5>.

Sidorin A.Y. Diurnal periodicity of strong earthquakes of Garm research area // Seism. Instruments, 2009, vol. 45, p. 90–94. <https://doi.org/10.3103/S0747923909010162>.

Sidorin A.Y. The 15-minute periodicity of earthquakes in Greece // Seism. Instruments, 2011, vol. 47, p. 89–92. <https://doi.org/10.3103/S0747923911010142>.