



ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИКАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ ПОЛЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Р.Р. НИГМАТУЛЛИН¹, А.П. БЕЛОВ², А.М. ЕРОХИН^{3,*}, А.В. ПЕТРОВ²

¹ ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет» им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ)

10, ул. К. Маркса, г. Казань, 420111, Россия

² ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

³ ООО «Петровайзер»

4, корп. 2, ул. Макарова, г. Тверь 170002, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Анализ и обработка сигналов со сложной структурой, в частности частотно-фазовой модуляцией, представляет собой актуальную задачу, особенно в тех случаях, когда традиционные методы не обеспечивают достаточной точности. В работе рассматривается модифицированное Фурье-преобразование, подходящее для обработки сигналов с модулированными частотой и фазой, которые в статье обозначаются как частотно-фазово модулированные сигналы.

Цель. Разработка и применение модифицированного Фурье-преобразования для получения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) сигналов с целью повышения точности подгонки сигналов и решения задач, связанных с моделированием откликов сложных систем.

Материалы и методы. Предложенное преобразование применяется напрямую к сигналу и благодаря своей строго периодической структуре позволяет получить АЧХ с высокой точностью. Метод был апробирован на гравиметрических данных, полученных с приборов ГНУ-КВ и CG-6. Эти данные представляют собой временные вариации гравитационного поля без тренда, что традиционно затрудняет их описание и интерпретацию.

Результаты. Показано, что предложенное преобразование эффективно справляется с задачей нахождения АЧХ ЧФМ-сигналов, включая те, что непосредственно присутствуют в структуре преобразования. Полученные результаты демонстрируют высокую точность подгонки, открывая новые возможности для анализа сложных систем без необходимости создания подробных физических моделей.

Заключение. Модифицированное Фурье-преобразование может служить полезным инструментом для построения подгоночных функций в форме АЧХ при исследовании сложных систем. В гравиметрии это открывает новые перспективы как для фундаментальных исследований, так и для решения прикладных геолого-геофизических задач.

Ключевые слова: частотно-фазовый модулированный сигнал (ЧФМ), амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), временные вариации гравитационного поля, гравиметры

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Нигматуллин Р.Р., Белов А.П., Ерохин А.М., Петров А.В. Применение модификационного преобразования Фурье для моделирования вариаций поля силы тяжести. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2025;67(4):87—101. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-4-87-101> EDN: [RVCISB](#)

Статья поступила в редакцию 17.02.2025
Принята к публикации 03.04.2025
Опубликована 22.12.2025

* Автор, ответственный за переписку

APPLICATION OF A MODIFIED FOURIER TRANSFORMATION FOR MODELING VARIATIONS IN THE GRAVITY FIELD

RAOUL R. NIGMATULLIN¹, ALEXEY P. BELOV², ALEXANDR M. EROKHIN^{3,*}, ALEXEY V. PETROV²

¹ A.N. Tupolev Kazan National Research Technical University (KNRTU-KAI)
10, K. Marx str., Kazan, 420111, Russia

² Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

³ Petroviser LLC
4, bld. 2, Makarova str., Tver, 170002, Russia

ABSTRACT

Introduction. The analysis and processing of signals with complex structures — particularly those exhibiting frequency and phase modulation — remains a relevant challenge, especially in cases where traditional methods fail to provide sufficient accuracy. This study considers a modified Fourier transformation suitable for processing signals with modulated frequency and phase, referred to in the article as frequency-phase modulated (FPM) signals.

Objective. To develop and apply a modified Fourier transformation for obtaining the amplitude-frequency characteristics (AFC) of FPM signals, aiming to improve the accuracy of signal fitting and to address problems related to modeling the responses of complex systems.

Materials and methods. The proposed transformation is applied directly to FPM signals and, due to its strictly periodic structure, enables the accurate determination of their AFC. The method was tested on gravimetric data acquired using the GNU-KB and CG-6 gravimeters. These data represent detrended temporal fluctuations of the gravity field, which are typically difficult to describe and interpret using conventional methods.

Results. It has been demonstrated that the proposed transformation effectively addresses the problem of determining the AFC of FPM signals, including those embedded within the transformation itself. The results show a high degree of fitting accuracy, thereby offering new opportunities for analyzing the responses of complex systems without the need for detailed physical modeling.

Conclusion. The modified Fourier transformation may serve as a valuable tool for constructing fitting functions in the form of AFCs when studying complex systems. In gravimetry, this approach opens new prospects for both fundamental research and the solution of applied geological and geophysical problems.

Keywords: frequency-phase modulated signal (FPM); amplitude-frequency characteristic (AFC); temporal gravity field variations; gravimeters

Conflict of Interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosures: the research received no external funding.

For citation: Nigmatullin R.R., Belov A.P., Erokhin A.M., Petrov A.V. Application of a modified fourier transformation for modeling variations in the gravity field. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2025;67(4):87—101. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-4-87-101> EDN: [RVCISB](https://www.rvcisb.ru)

Manuscript received 17 February 2025

Accepted 03 April 2025

Published 22 December 2025

* Corresponding author

Введение

Вариации поля силы тяжести, регистрируемые на поверхности земной коры, являются продуктом процессов естественного и техногенного происхождения, которые имеют различный характер (резкие мгновенные, периодические или квазипериодические, вековые). В зависимости от пространственной протяженности они могут быть локальными, региональными или глобальными. Изучение и анализ таких временных вариаций поля силы тяжести обеспечивает наблюдателя данными о кинематике и динамике Земли для решения ряда фундаментальных и прикладных задач геофизики. Исследование и разработка таких моделей в этой области еще только начинаются [3].

В данной работе предлагается новый подход к построению математических моделей вариаций гравитационного поля на основе использования модифицированного Фурье-преобразования инструментальных данных группы гравиметров при регистрации естественных колебаний земной поверхности.

Для понимания механизма влияния внешних процессов на вариации гравитационного поля необходимо найти математическую функцию, значения которой максимально приближены к экспериментальным гравиметрическим данным. Это достигается с помощью аппроксимации данных эмпирическими функциями. Аппроксимация позволяет изучать числовые характеристики и свойства объекта, сводя задачу к анализу более простых математических моделей. Процесс аппроксимации заключается в построении функции, которая наилучшим образом соответствует исходным данным с минимальной погрешностью.

Целью аппроксимации является построение математической модели, максимально приближенной к «идеальной» модели, которая воспроизводит измеренные данные с минимальными ошибками и высокой достоверностью.

При выборе подходящей аппроксимирующей функции необходимо учитывать параметры, наиболее точно описывающие зависимость между изучаемыми величинами. Из нескольких подходящих вариантов выбирается модель на основе баланса между точностью аппроксимации и простой вычислительной конструкции модели.

Теория предлагает модели, гипотезы, основанные на некоторых проверяемых предположениях и постулатах. Эксперимент, в свою очередь, проверяет эти гипотезы, стараясь максимально исключить влияние неконтролируемых факторов и искажений (помех), вносимых измерительной

аппаратурой (обычно эти факторы определяются как аппаратная функция или функция прибора) и учета случайных «гостевых» процессов — совокупности внешних и локальных факторов, не выясненной и до конца не изученной природы, но влияющих на изучаемые вариации гравитационного поля. При этом необходим проверенный или верифицируемый принцип, которому подчиняются практически все измерения, из математической формулировки которого можно будет вывести некую «универсальную» подгоночную функцию, которая позволила бы описать все измерения. Таким образом, на основе этого принципа можно будет получить общую математическую модель, которой должны будут подчиняться все измерения, удовлетворяющие этому принципу.

Постановка задачи

Фактически каждый исследователь, применяющий Ф-преобразование, осведомлен об основном его недостатке. Этот недостаток кроется в предположении, что исходный случайный сигнал является строго периодическим, т.е:

$$Sg(t + T) = T Sg(t). \quad (1)$$

Здесь $Sg(t)$ определяет исходный случайный сигнал, T — период, совпадающий с $\text{Range}(t)$, где размах $\text{Range}(t) = \max(t) - \min(t)$ определяет приближенно длину исходного сигнала $Sg(t)$.

Во многих случаях это предположение недоказуемо, и поэтому многие исследователи пытаются преодолеть этот недостаток различными методами и способами. Если мы захотим заменить чистый периодический сигнал на некую аperiodическую копию, то мы столкнемся со следующей проблемой. Проблема подгонки дискретных аperiodических сигналов не решается с помощью интегрального преобразования Фурье аperiodических сигналов, поэтому его нельзя использовать для предсказания дискретного аperiodического сигнала за пределами заданного интервала временного окна. Дискретные представления многих аналоговых сигналов играют важную роль в их обработке. Они содержат необходимую информацию, связанную со свойствами сигналов, и допускают их дальнейшую обработку [18]. В традиционной схеме сигналы могут быть представлены в виде рядов Тейлора-Макларена, Дирихле, Лорана, Лежандра, Паде, Прони и Фурье. Хотелось бы подчеркнуть, что эти разложения в ряды используются без какого-либо математического обоснования.

Разложение в классический ряд Фурье (РФ) является наиболее простым и часто используемым инструментом в области обработки сигналов. Однако он не позволяет выделить как субгармонические, так и интергармонические компоненты заданного сигнала и во многих ситуациях имеет серьезные недостатки [5, 8, 16, 26].

Предлагаемый метод позволяет преодолеть ограничения Фурье-анализа. Фурье-анализ основан на временно-частотных методах [9], которые использовались в последние несколько десятилетий, а именно: дробный [4, 24, 25], кратковременный [15, 21, 23], оконный ФТ [11, 13], Габора [22, 29, 31], вейвлет [14, 17, 28], Гильберта — Хуанга [10, 20, 30], преобразования Фурье — Бесселя [6, 7, 12] и даже разложение по эмпирическим модам [27]. Эти ссылки лишней раз показывают, что существует множество различных приближений для преодоления основного недостатка (1). Однако внимательный анализ позволяет сформулировать следующую задачу:

Существует ли простое и универсальное преобразование исходного сигнала, позволяющее преобразовать его в другой цифровой сигнал, имеющий строго период равный 2π ? Оказывается, этот вопрос может быть решен положительно, если записать следующее соотношение

$$Sg(t) = a \cdot \cos(F(t)) + b, \quad (2)$$

и попытаться анализировать вместо исходной функции $Sg(t)$ аргумент $F(t)$ функции косинуса для получения желаемого результата. Функция $F(t)$ представляет собой объединенный ЧФМ-сигнал и обеспечивает желаемый интервал $[-1, 1]$ для $\cos(F(t))$, а искомый аргумент $F(t)$ попадает в периодический интервал $[0, \pi]$. Поэтому конечный результат разложения любого сигнала сохраняет структуру вида (2), если к нему добавить разложение $F(t)$ в форме подгоночной функции $Yft(t, K)$ в виде конечного отрезка РФ.

$$F(t) \cong Yft(t, K) = Ph_0 + \sum_{k=1}^K [Ac_k \cos(\Omega_k t) + As_k \sin(\Omega_k t)], \quad (3)$$
$$\Omega_k = 2, 3, \dots, K$$

Разложение (3) учитывает свойство аргумента $F(t) = F(t \pm \pi)$, определяющее полу-периодическую функцию. Таким образом, эти два простых выражения (2) и (3) решают задачу разложения любой случайной функции $Sg(t)$ в РФ, базируясь на разложении аргумента $F(t)$.

Описание гравиметрических данных

Для реализации этой постановки задачи были проведены эксперименты по регистрации вариаций силы тяжести одновременно несколькими гравиметрами на базе фундаментального гравиметрического пункта «Ледово» [2].

В комплексе геофизической аппаратуры используются гравиметрические приборы различных типов, действующие на одних и тех же физических принципах и обладающие общим частотным диапазоном. Расположение всех гравиметров на одном геофизическом постаменте позволяет считать зарегистрированные инерционные помехи идентичными по происхождению. Давление, температура, дрейф нуля при данных измерениях не оказывают значительного влияния на результаты измерений.

Гравиметры нового поколения SCINTREX CG-6 оснащены блоками компьютерной обработки, которые позволяют вводить вычисленные поправки в показания прибора в режиме реального времени, существенно снизив влияние помех и обеспечив точность измерений порядка 0,001 мГал. Автоматическое снятие показаний и непрерывная дискретизация данных минимизируют ошибки оператора

Гравиметр ГНУ-КВ был адаптирован для регистрации вариаций гравитационного поля с использованием видеокамеры в качестве ключевого элемента процесса цифровизации показаний. Это инновационное решение позволяет с высокой точностью фиксировать и детально анализировать вариации гравитационного поля, в том числе амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) [1].

В данной работе анализ АЧХ ограничивается только для пары приборов ГНУ-КВ и SCINTREX CG-6, так как SCINTREX CG-6 является базовым прибором при регистрации вариаций гравитационного поля на фундаментальном гравиметрическом пункте «Ледово».

Алгоритм обработки данных

Так как данные от двух гравиметров представляют собой прямоугольные матрицы с числом строк $N = 1000$ и столбцов $M = 55$, то (для иллюстрации предлагаемого метода и сохранения приемлемого объема страниц данной статьи) можно выделить только три характерных сигнала с максимальным, средним и минимальными значениями соответственно. Значения этих трех столбцов исходных матриц находятся из так называемой трубы доверия (ТД), которая показывает распределения этих трех значений по всей совокупности столбцов исходных матриц.

Для первичного анализа выберем матрицу данных гравиметра GNUKV. Труба доверия для этой матрицы показана на рисунке 1а, б.

На рисунке 1а, б показаны распределения экстремальных значений ТД по всем 55 столбцам. Максимальные и минимальные значения выделены соответственно красным и зеленым цветами. Распределение средних значений выделено синим цветом и ввиду малости их значений показано отдельно на правом рисунке. Максимальное и минимальные значения соответствуют столбцу матрицы под нулевым и 14-м номером и явно видны на левом рисунке.

На рисунке 2а, б показаны три самых характерных сигнала, выделенных по характерным экстремальным точкам ТД и подлежащих подгону. Напрямую такой подгон с высокой точностью практически невозможен, но расчет их аргументов $F_p(t)$, допускающих строгое разложение в РФ, позволяет решить поставленную задачу. Для дальнейших целей удобно использовать в качестве

независимой переменной нормированную на единицу переменную $x_j = j/N$.

На рисунке 3 показаны все три функции аргументов, подлежащих подгону. На левом рисунке (а) красным и зеленым цветом соответственно показаны функции $F_{0,2}(t)$ для максимальных и минимальных значений, а на правом рисунке (б) показана функция $F_1(t)$ для распределения средних значений, показанная на рисунке 2 справа.

Эти три функции строго периодические (нетрудно заметить, что все они лежат в интервале $[0, \pi]$), и поэтому к ним применимо разложение (3). Для более точных расчетов мы применим к ним метод Неортогонального Комбинированного Фурье Анализа Сглаженных Сигналов (НОКФАСС) [19], предложенного одним из авторов (РРН) этой статьи. Суть этого комбинированного метода состоит в том, что весь спектр частот сдвигается к центру на угол π и из всего избыточного спектра частот используется только их малая часть, расположенная справа от резонансной частоты.

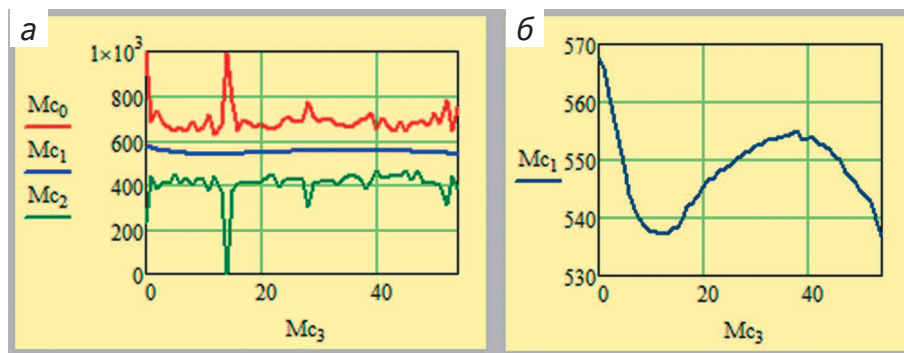


Рис. 1. Распределение максимальных значений ТД. Слева на рисунке (а) показаны распределения максимальных, средних и минимальных значений по всей совокупности столбцов исходной матрицы измерений. Ввиду того что среднее значение принимает малые значения, то это распределение выделено на отдельном рисунке справа
Fig. 1. Distribution of maximum TD values. On the left, Figure (a) shows the distribution of maximum, average, and minimum values across the entire set of columns of the original measurement matrix. Due to the fact that the average value takes on small values, this distribution is highlighted in a separate figure on the right

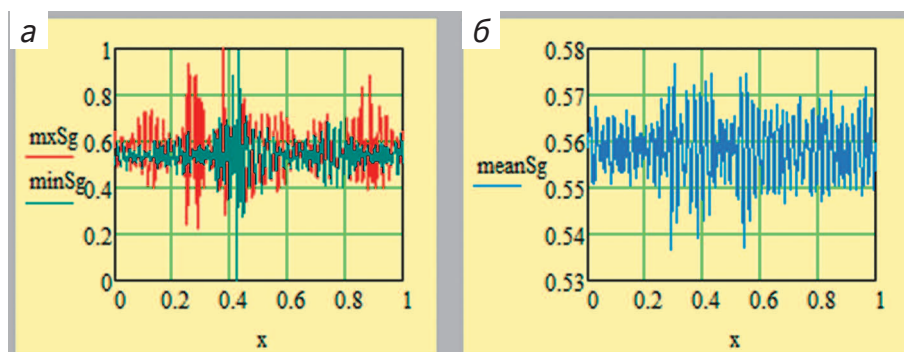


Рис. 2. Наиболее характерные сигналы, выделенные по экстремумам ТД и подлежащие дальнейшему подгону
Fig. 2. The most characteristic signals identified by the extremes of TD and subject to further adjustment

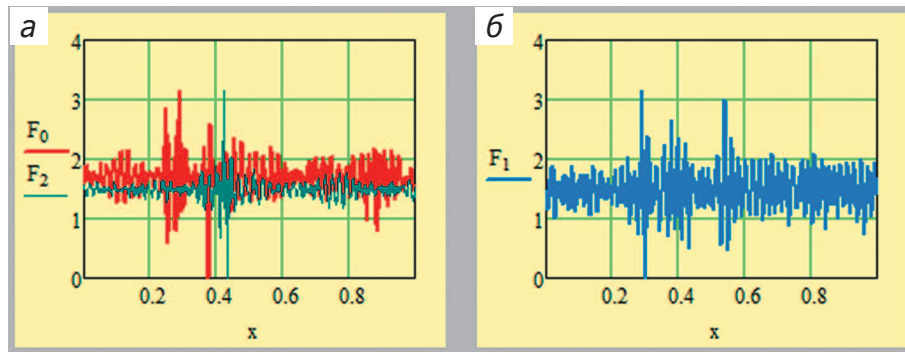


Рис. 3. Функции аргументов $F_p(t)$, выделенных теми же цветами, что и на прежнем рисунке, и подлежащие подгону

Fig. 3. Functions of arguments $F_p(t)$, highlighted in the same colors as in the previous drawing and subject to adjustment

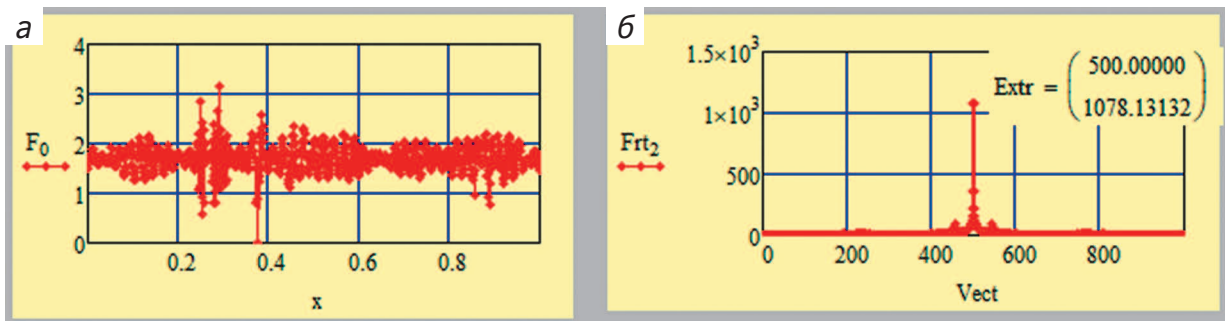


Рис. 4. Слева (а) показан аргумент $F_0(t)$, соответствующий максимальному распределению. Справа (б) — А-преобразование, сдвинутое на угол π . Для подгоночных целей достаточно взять набор частот от центральной резонансной частоты до 650

Fig. 4. On the left (a), the argument $F_0(t)$ is shown, corresponding to the maximum distribution. On the right (b) is A transformation shifted by an angle π . For fitting purposes, it is sufficient to take a set of frequencies from the central resonant frequency to 650

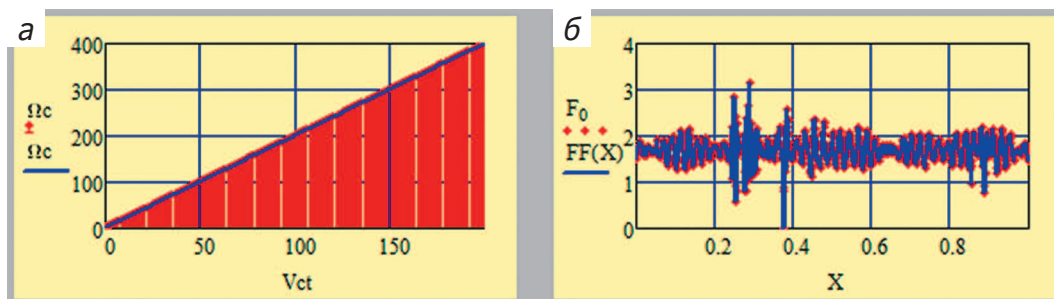


Рис. 5. Слева (а) показан укороченный спектр, расположенный в полосе [2—400]. Справа (б) показан подгон распределения $F_0(t)$. Точность подгона весьма высокая: относительная ошибка не превышает 0,2%

Fig. 5. The shortened spectrum located in the band [2—400] is shown on the left (a). On the right (b), the fitting of the distribution $F_0(t)$ is shown. The accuracy of the fitting is very high: the relative error does not exceed 0.2%

На рисунке 4 объяснена суть НОКФАСС. Слева (а) показана функция $F_0(t)$, а справа — (б) ее Ф-спектр. Резонансная частота располагается ровно посередине на $N/2 = 500$. Для подгоночных целей достаточно взять безразмерную полосу частот [500, 650].

Так как спектр периодической функции известен и приемлемая полоса частот для подгона определена, то дальнейшие действия осуществляются по стандартному МНК.

На рисунке 5 слева (а) показан укороченный спектр частот, применимый для подгоночных

целей. Он расположен в полосе [2—400]. Справа (б) показан подгон функции $F_0(t)$. Точность подгона весьма высокая и величина относительной ошибки меньше чем 0,2%. Она рассчитывается по известной формуле

$$RelErr(K) = \left[\frac{stdev(F(t) - Yft(t, K))}{mean|F(t)|} \right] \cdot 100\% \quad (4)$$

Более точные значения приведены в таблице 1.

На рисунке 6 показано распределение модуля амплитуд $Amd_k = \sqrt{Ac_k^2 + As_k^2}$ слева (а) и распределение фаз, вычисляемое по формуле $arctg(As_k/Ac_k)$ для функции $F_0(t)$ справа (б). Заметим, что распределение фаз практически равномерное, так как последовательность ранжированных амплитуд (ПРА), выделенная сплошной синей линией на правом рисунке, практически совпадает с отрезком прямой линии.

На рисунке 7а, б, в проиллюстрирован переход от функций аргумента тригонометрической функции $F_0(t)$ к исходной функции распределения максимумов, расположенных на правом рисунке вместе с ее подгоночной функцией. Для нахождения окончательных параметров a и b используются

выражения (2) и (5), показанное ниже. Эти параметры приведены в таблице 1.

$$Ex(t) = a \cdot \cos(Yft(t)) + b. \quad (5)$$

Так как новый подход был подробно объяснен на примере подгона функции $F_0(t)$, то авторы избавлены от необходимости дублировать метод, используемый для других функций $F_{1,2}(t)$. Мы приведем только окончательные результаты фитинга этих функций, необходимых для сравнительного анализа, сохраняя по возможности прежние настройки вычислительной программы.

На рисунке 8 слева (а) показан укороченный спектр частот, применимый для подгоночных целей. Он расположен в той же полосе [2—400]. Справа (б) показан подгон функции $F_1(t)$. Точность подгона весьма высокая и величина относительной ошибки меньше чем 0,2%.

На рисунке 9 показано распределение модуля амплитуд $Amd_k = \sqrt{Ac_k^2 + As_k^2}$ слева (а) и распределение фаз, вычисляемое по формуле $Phase_k = arctg(As_k/Ac_k)$ для функции $F_1(t)$, справа (б). Заметим, что распределение фаз, как и в первом случае, практически равномерное, так как последовательность ранжированных амплитуд (ПРА),

Таблица 1. Основные подгоночные параметры, которые были использованы для подгона аргументов функций $F_p(t)$ — гравиметр GNUKV

Table 1. The main fitting parameters that were used to adjust the arguments of the $F_p(t)$ functions. — GNUKV gravimeter

Function	F_{res}	Ph_0	RelErr(%)	K	a	b
$F_0(t)$	1078,131	0,1041	0,183	400	0,38594	0,61406
$F_1(t)$	950,547	0,1038	0,176	400	0,0021	0,55684
$F_2(t)$	944,062	0,5810	0,114	400	0,4955	0,4955

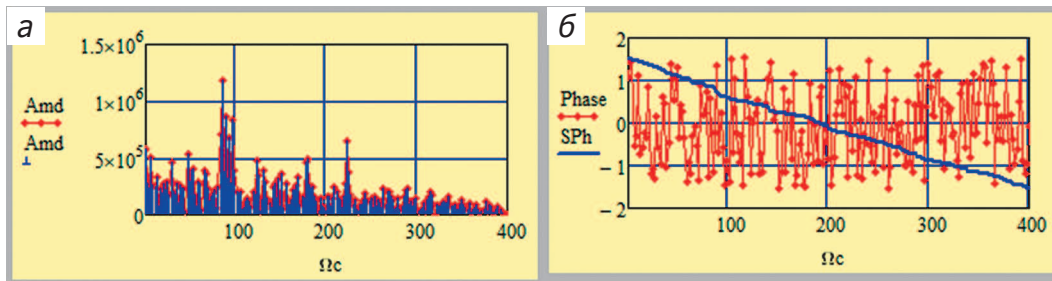


Рис. 6. Слева (а) показано распределение модуля амплитуд, справа (б) показано распределение фаз. Голубая линия выделяет последовательность ранжированных амплитуд (ПРА). Ее близость к отрезку прямой показывает, что распределение фаз — равномерное

Fig. 6. On the left (a) shows the distribution of the amplitude modulus, on the right (b) shows the phase distribution. The blue line highlights the sequence of ranked amplitudes (PRA). Its proximity to a straight line segment shows that the phase distribution is uniform

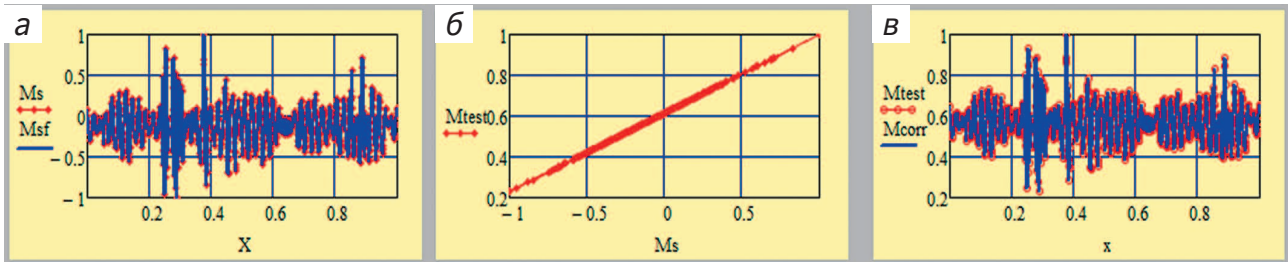


Рис. 7. Переход от функции $\cos(F_0(t))$ (рис. а) к исходной функции распределения максимумов (в) через линейное преобразование (2). Оно показано на центральном рисунке (б)

Fig. 7. Transition from the $\cos(F_0(t))$ function (Fig. (a)) to the initial maximum distribution function (b) via linear transformation (2). It is shown in the central figure (b)

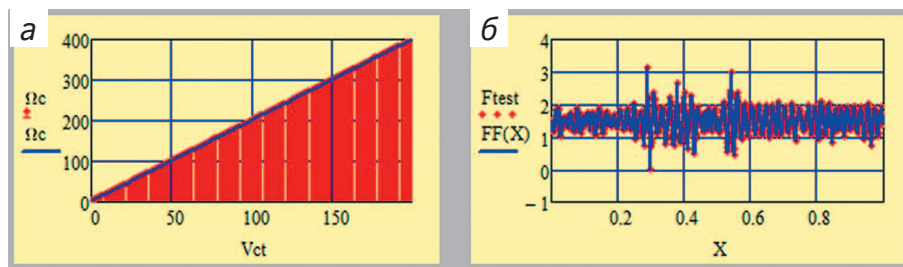


Рис. 8. Слева (а) показан укороченный спектр, расположенный в полосе [2—400]. Справа (б) показан подгон распределения $F_1(t)$. Точность подгона весьма высокая: относительная ошибка не превышает 0,2%

Fig.8. The shortened spectrum located in the band [2—400] is shown on the left (a). On the right (b), the fit of the $F_1(t)$ distribution is shown. The accuracy of the fitting is very high: the relative error does not exceed 0.2%

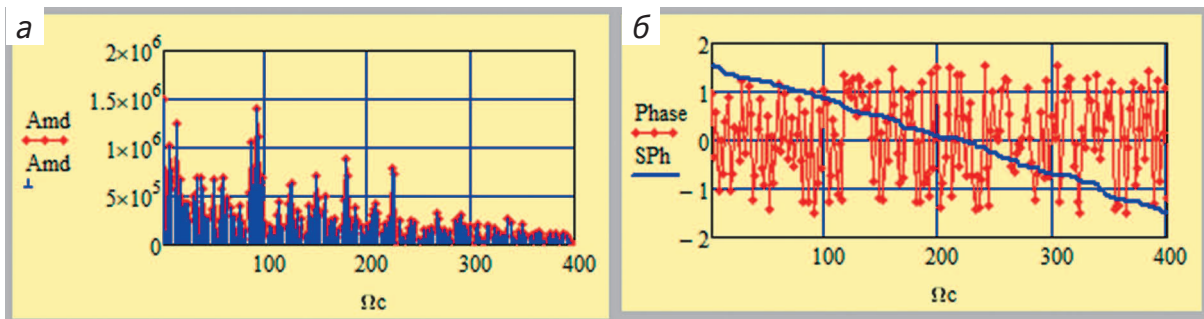


Рис. 9. Слева (а) показано распределение модуля амплитуд, справа на рисунке (б) показано распределение фаз. Это АЧХ относится к функции $F_1(t)$. Голубая линия выделяет последовательность ранжированных амплитуд (ПРА). Ее близость к отрезку прямой показывает, что распределение фаз — равномерное

Fig. 9. On the left (a) shows the distribution of the amplitude modulus, on the right in Figure (b) shows the phase distribution. This frequency response refers to the $F_1(t)$ function. The blue line highlights the sequence of ranked amplitudes (PRA). Its proximity to a straight line segment shows that the phase distribution is uniform

выделенная сплошной синей линией на правом рисунке, как и ранее, практически совпадает с отрезком прямой линии.

Для экономии места мы опускаем рисунки, объясняющие переход к исходному усредненному сигналу. Соответствующие параметры a и b , осуществляющие этот переход по формуле (2), приведены в таблице 1.

Аналогичным образом для полноты картины приводим 4 рисунка для аргумента $F_2(t)$.

На рисунке 10 слева (а) показан укороченный спектр частот, применимый для подгоночных целей [2—400]. Как и для прежних случаев, он расположен в той же полосе [2—400]. Справа (б) показан подгон функции $F_2(t)$. Точность подгона весьма высокая и величина относительной

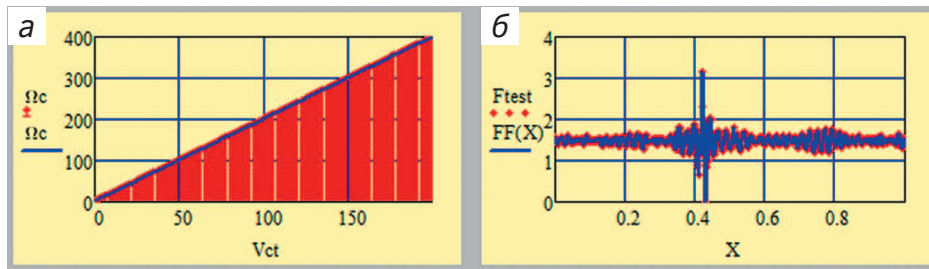


Рис. 10. Слева (а) показан укороченный спектр, расположенный в той же полосе [2—400]. Справа (б) показан подгон распределения $F_2(t)$. Точность подгона весьма высокая: относительная ошибка не превышает 0,2%

Fig. 10. The shortened spectrum located in the same band [2—400] is shown on the left (a). On the right (b), the fitting of the $F_2(t)$ distribution is shown. The accuracy of the fitting is very high: the relative error does not exceed 0.2%

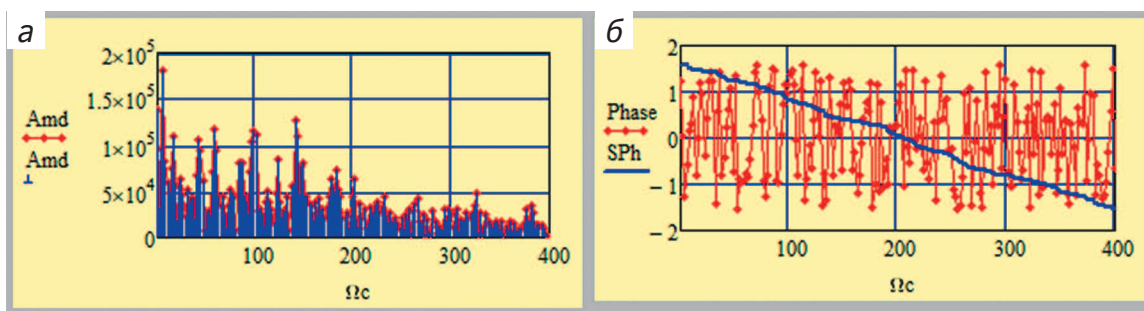


Рис. 11. На рисунке слева (а) показано распределение модуля амплитуд, справа на рисунке (б) показано распределение фаз. Это АЧХ относится к функции $F_2(t)$. Голубая линия выделяет последовательность ранжированных амплитуд (ПРА). Ее близость к отрезку прямой показывает, что распределение фаз — равномерное

Fig. 11. The figure on the left (a) shows the distribution of the amplitude modulus, and on the right (b) shows the phase distribution. This frequency response refers to the function $F_2(t)$. The blue line highlights the sequence of ranked amplitudes (PRA). Its proximity to the straight line segment shows that the phase distribution is uniform

ошибки, как и ранее, меньше чем 0,2%. Точные значения приведены в таблице 1.

На рисунке 11 показано распределение модуля амплитуд $Amd_k = \sqrt{Ac_k^2 + As_k^2}$ слева (а) и распределение фаз, вычисляемое по формуле $Phase_k = \arctg(As_k/Ac_k)$ для функции $F_2(t)$, справа (б). Заметим, что распределение фаз, как и в первом случае, практически равномерное, так как последовательность ранжированных амплитуд (ПРА), выделенная сплошной синей линией на правом рисунке, как и ранее, практически совпадает с отрезком прямой линии.

Общий вывод, который следует из предварительного анализа рисунков 6—11, таков: усеченные спектры Ω_k для всех трех функций $F_p(t)$ одинаковы и расположены в интервале [2—400]. Основные отличия для всех трех $F_p(t)$ лежат в распределениях модулей амплитуд (рис. 6а, 9а и 11а соответственно).

Совершенно аналогичным образом обрабатываются данные по гравиметру CG-6. Приведем (в целях экономии места) только основные рисунки, выделяющие различия между ними.

По ТД определяются следующие колонки. Вторая для распределения максимумов, а минимальная совпадает с нулевой колонкой. Поэтому экстремальные файлы представлены следующими рисунками.

На рисунке 12а, б показаны три самых характерных сигнала для гравиметра CG-6, выделенных по критерию ТД и подлежащих подгону. Мы сохраняем те же обозначения для аргументов $F_p(t)$, допускающих строгое разложение в РФ, что позволяет решить поставленную задачу. Как это было сделано ранее, удобно использовать в качестве независимой переменной нормированную на единицу переменную $x_j = j/N$.

На рисунке 13 показаны все три функции аргументов для гравиметра CG6, подлежащих подгону. На левом рисунке (а) красным и зеленым цветом соответственно показаны функции $F_{0,2}(t)$ для максимальных и минимальных значений, а на правом рисунке (б) показана функция $F_1(t)$ для средней функции, изображенная на прежнем рисунке справа. Заметим, что все они автоматически приводятся к интервалу $[0, \pi]$.

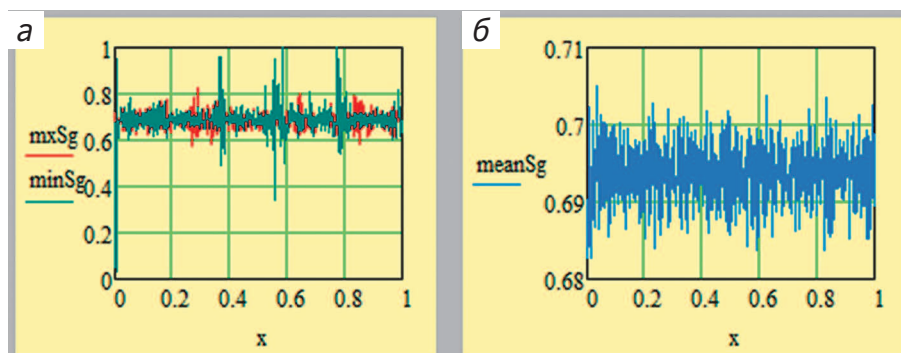


Рис. 12. Распределение максимальных значений ТД. Слева на рисунке (а) показаны распределения максимальных, средних и минимальных значений по всей совокупности столбцов исходной матрицы измерений. Ввиду того что среднее значение принимает малые значения, это распределение выделено на отдельном рисунке справа
Fig. 12. Distribution of maximum TD values. Figure (a) on the left shows the distribution of maximum, average, and minimum values across the entire set of columns of the original measurement matrix. Due to the fact that the average value takes on small values, this distribution is highlighted in a separate figure on the right

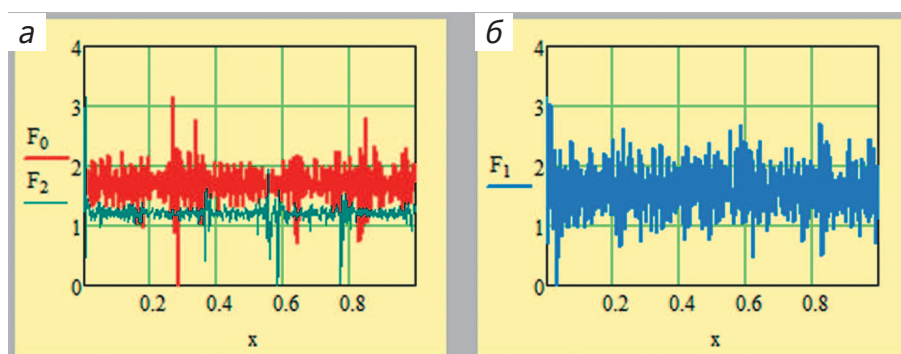


Рис. 13. Функции аргументов $F_p(t)$, выделенные теми же цветами, что и на прежнем рисунке, (3) и подлежащие подгону
Fig. 13. The functions of the arguments $F_p(t)$, highlighted in the same colors as in the previous figure (3) and subject to adjustment

Так как усеченный спектр для второго гравиметра также сохраняется, то мы приведем только подгон функции $F_0(t)$ и распределение модуля амплитуд. Фазовые распределения также носят равномерный характер и поэтому в целях экономии места могут быть опущены.

Рисунок 14 показывает распределение модуля амплитуд $Amd_k = \sqrt{Ac_k^2 + As_k^2}$ слева (а) и подгон функции $F_0(t)$ справа (б). Распределение фаз, как и для первого гравиметра, практически равномерное, и поэтому этот рисунок мы не приводим как малоинформативный.

На рисунке 15 показано распределение модуля амплитуд $Amd_k = \sqrt{Ac_k^2 + As_k^2}$ слева (а) и подгон функции $F_1(t)$ справа (б). Распределение фаз, как и для первого гравиметра, практически равномерное, и поэтому этот рисунок мы также не приводим.

На рисунке 16 показано распределение модуля амплитуд $Amd_k = \sqrt{Ac_k^2 + As_k^2}$ слева (а) и подгон функции $F_1(t)$ справа (б). Распределение фаз, как и для первого гравиметра, практически равномерное, и поэтому этот рисунок мы опускаем. Точные значения параметров подгонки для гравиметра CG-6 приведены в таблице 2.

Результаты и их обсуждение

Впервые предложен новый оригинальный подход к построению математической модели временного поведения системы флуктуаций вариации силы тяжести, основанный на простом и универсальном преобразовании исходного сигнала, позволяющий преобразовать его в другой цифровой сигнал, имеющий строгую периодичность равную 2π , используя при этом разложение модифицированное Фурье-преобразование, которое

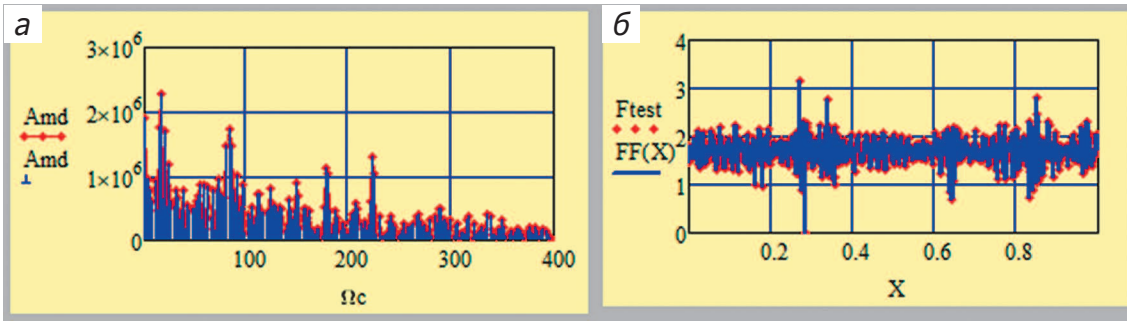


Рис. 14. Распределение модуля амплитуд слева (а) и подгон функции $F_0(t)$ справа (б)
 Fig. 14. The distribution of the amplitude modulus on the left (a) and the fitting of the function $F_0(t)$ on the right (b)

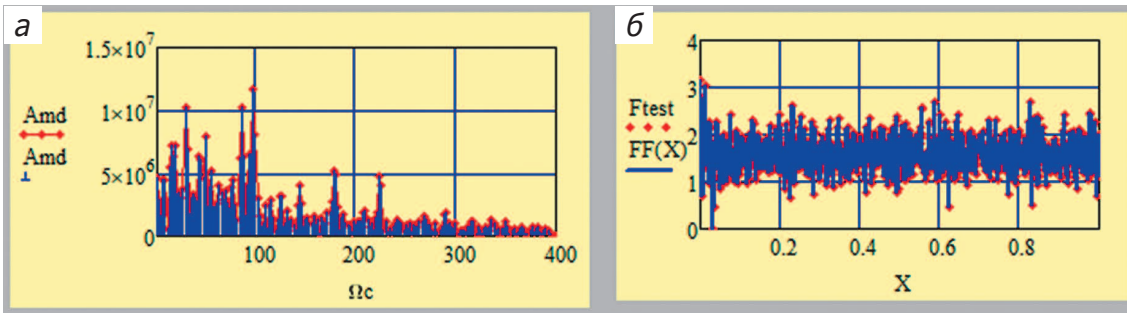


Рис. 15. Распределение модуля амплитуд слева (а) и подгон функции $F_1(t)$ справа (б)
 Fig. 15. The distribution of the amplitude modulus on the left (a) and the fit of the $F_1(t)$ function on the right (b)

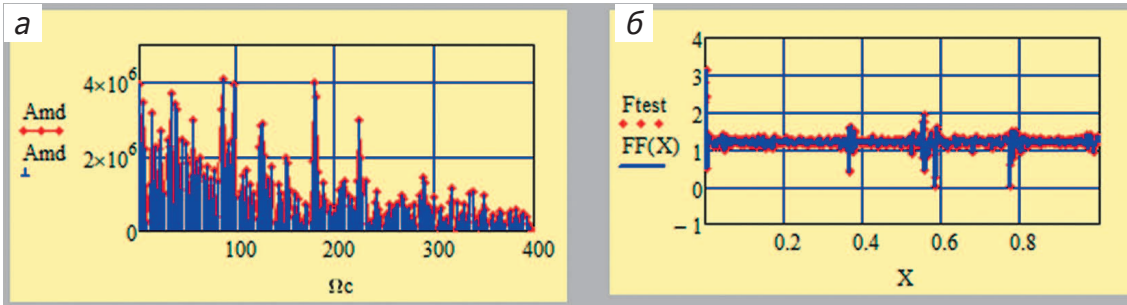


Рис. 16. Распределение модуля амплитуд слева (а) и подгон функции $F_2(t)$ справа (б)
 Fig. 16. The distribution of the amplitude modulus on the left (a) and the fit of the $F_2(t)$ function on the right (b)

справедливо для любого сигнала, в котором про-
 моделированы частота и фаза, что может успешно
 применяться при решении задачи разложения лю-
 бой случайной функции.

Такой подход значительно приближает нас
 к пониманию построения математической моде-
 ли временного поведения системы флуктуаций
 вариации силы тяжести для изучаемого региона,

Таблица 2. Основные подгоночные параметры, которые были использованы для подгона аргументов функций $F_p(t)$ — гравиметр CG-6

Table 2. The main fitting parameters that were used to adjust the arguments of the $F_p(t)$ functions. — gravimeter CG-6

Function	F_{res}	Ph_0	RelErr(%)	K	a	b
$F_0(t)$	1075,869	0,035	0,315	400	0,1266	0,70176
$F_1(t)$	1006,841	0,95054	0,364	400	0,0112	0,6938
$F_2(t)$	762,871	0,9103	0,241	400	0,4840	0,5161

а также позволит выяснить, какие физические процессы продуцируют зарегистрированный данный временной ряд, учитывающий влияние случайных «гостевых» процессов не до конца изученной природы, порожденных внешними

случайными факторами. Это позволяет нам количественно охарактеризовать изменение системы со временем, понять происходящие в ней процессы и, в конечном итоге, построить ее теоретическую модель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лобанов А.М., Белов А.П., Ерохин А.М., Венедиктов К.В. Алгоритм распознавания видеофайла для оцифровки колебаний аналогового индикатора на примере кварцевого гравиметра ГНУ-КВ. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2024. № 66(1). С. 128—134. DOI: 10.32454/0016-7762-2024-66-1-128-134
2. Нигматуллин Р.Р., Белов А.П., Ерохин А.М., Мухаметзянов А.Р., Конешов В.Н., Дробышев М.Н. Построение и анализ некоторых математических моделей, связанных с временными вариациями гравитационного поля. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2025. № 67(2). С. 76—94.
3. Торге В. Гравиметрия. Пер. с англ.: Г.А. Шануров; ред. А.П. Юзефович. М.: Мир, 1999. 428 с.
4. Almeida L.B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations. *IEEE Trans. Signal Process.* 1994. No. 42. P. 3084—3091.
5. Arecchi F., Meucci R., Puccioni G., Tredicce J. Experimental evidence of subharmonic bifurcations, multistability, and turbulence in a Q-switched gas laser. *Phys. Rev. Lett.* 1982. No. 49. P. 1217—1220.
6. Bhattacharyya A., Singh L., Pachori R.B. Fourier-Bessel series expansion based empirical wavelet transform for analysis of non-stationary signals. *Digit. Signal Process.* 2018. No. 78. P. 185—196.
7. Chaudhary P.K., Gupta V., Pachori R.B. Fourier-Bessel representation for signal processing: A review. *Digit. Signal Process.* 2023. No. 135. P. 103938.
8. Chen J., Chau K., Chan C., Jiang Q. Subharmonics and chaos in switched reluctance motor drives. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2002. No. 17. P. 73—78.
9. Cohen L. *Time-Frequency Analysis*; Prentice Hall Press: NJ, USA, 1995. Vol. 778.
10. De Souza U.B., Escola J.P.L., da Cunha Brito L. A survey on Hilbert-Huang transform: Evolution, challenges and solutions. *Digit. Signal Process.* 2022. No. 120. P. 103292.
11. Hlubina P., Luňáček J., Ciprian D., Chlebus R. Windowed Fourier transform applied in the wavelength domain to process the spectral interference signals. *Opt. Commun.* 2008. No. 281. P. 2349—2354.
12. Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.C., Tung C.C., Liu H.H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. R. Soc. Lond. A Math. Phys. Eng. Sci.* 1998. No. 454. P. 903—995.
13. Kemaq Q. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis. *Appl. Opt.* 2004. No. 43. P. 2695—2702.
14. Kumar A. Wavelet signal processing: A review for recent applications. *Int. J. Eng. Tech.* 2020. No. 6. P. 12.
15. Li M., Liu Y., Zhi S., Wang T., Chu F. Short-time Fourier transform using odd symmetric window function. *J. Dyn. Monit. Diagn.* 2022. No. 1. P. 37—45.
16. Lauterborn W., Cramer E. Subharmonic route to chaos observed in acoustics. *Phys. Rev. Lett.* 1981. No. 47. P. 1445.
17. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*, 3rd ed.; Academic Press: Burlington, MA, USA, 1999.
18. Mertins, A. *Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications*. Wiley: Chichester, UK, 1999.
19. Nigmatullin R.R., Alexandrov V., Agarwal P., Shilpi J., Necati O. Description of Multi-Periodic Signals Generated By Complex Systems: NOCFASS — New Possibilities of the Fourier Analysis. *Numerical Algebra, Control and Optimization*. March 2024. Vol. 14. No. 1. P. 1—19. DOI: 10.3934/naco.2022008
20. Peng Z.K., Peter W.T., Chu F.L. A comparison study of improved Hilbert-Huang transform and wavelet transform: Application to fault diagnosis for rolling bearing. *Mech. Syst. Signal Process.* 2005. No. 19. P. 974—988.
21. Portnoff M. Time-frequency representation of digital signals and systems based on short-time Fourier analysis. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* 1980. No. 28. P. 55—69.
22. Qian S., Chen D. Discrete Gabor transform. *IEEE Trans. Signal Process.* 1993. No. 41. P. 2429—2438.
23. Qian S., Chen, D. Joint time-frequency analysis. *IEEE Signal Process. Mag.* 1999. No. 16. P. 52—67.
24. Sejdíć E., Djurović I., Stanković L. Fractional Fourier transform as a signal processing tool: An overview of recent developments. *Signal Process.* 2011. No. 91. P. 1351—1369.
25. Su X., Tao R., Kang X. Analysis and comparison of discrete fractional Fourier transforms. *Signal Process.* 2019 No. 160. P. 284—298.
26. Wilden I., Herzel H., Peters G., Tembrock G. Subharmonics, biphonation, and deterministic chaos in mammal vocalization. *Bioacoustics* 1998. No. 9. P. 171—196.
27. Wu Z., Huang N.E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method. *Adv. Adapt. Data Anal.* 2009. No. 1. P. 1—41.
28. Yan R., Gao R.X., Chen X. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications. *Signal*

- Process. 2014. No. 96. P. 1—15.
29. Yao J., Krolak P., Steele C. The generalized Gabor transform. *IEEE Trans. Image Process.* 1995. No. 4. P. 978—988.
 30. Zayed A.I. Hilbert transform associated with the fractional Fourier transform. *IEEE Signal Process. Lett.* 1998. No. 5. P. 206—208.
 31. Zhao Z., Tao R., Li G., Wang Y. Clustered fractional Gabor transform. *Signal Process.* 2020. No. 166. P. 107240.

REFERENCES

1. Lobanov A.M., Belov A.P., Erokhin A.M., Venediktov K.V. An Algorithm for Video File Recognition for Digitizing Oscillations of an Analog Indicator Using the GNU-KB Quartz Gravimeter as an Example. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Geologiya i Razvedka.* 2024. No. 66(1). P. 128—134 (In Russ.). DOI: 10.32454/0016-7762-2024-66-1-128-134
2. Nigmatullin R.R., Belov A.P., Erokhin A.M., Mukhametzyanov A.R., Koneshov V.N., Drobyshev M.N. Construction and Analysis of Some Mathematical Models Related to Temporal Variations in the Gravity Field. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Geologiya i Razvedka.* 2025. No. 67(2). P. 76—94 (In Russ.).
3. Torge W. *Gravimetry*. Translated from English by G.A. Shanurov; edited by A.P. Yuzefovich. Moscow: Mir Publ., 1999. 428 p. (In Russ.).
4. Almeida L.B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations. *IEEE Trans. Signal Process.* 1994. No. 42. P. 3084—3091.
5. Arecchi F., Meucci R., Puccioni G., Tredicce J. Experimental evidence of subharmonic bifurcations, multistability, and turbulence in a Q-switched gas laser. *Phys. Rev. Lett.* 1982. No. 49. P. 1217—1220.
6. Bhattacharyya A., Singh L., Pachori R.B. Fourier-Bessel series expansion based empirical wavelet transform for analysis of non-stationary signals. *Digit. Signal Process.* 2018. No. 78. P. 185—196.
7. Chaudhary P.K., Gupta V., Pachori R.B. Fourier-Bessel representation for signal processing: A review. *Digit. Signal Process.* 2023. No. 135. P. 103938.
8. Chen J., Chau K., Chan C., Jiang Q. Subharmonics and chaos in switched reluctance motor drives. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2002. No. 17. P. 73—78.
9. Cohen L. *Time-Frequency Analysis*; Prentice Hall Press: NJ, USA, 1995. Vol. 778.
10. De Souza U.B., Escola J.P.L., da Cunha Brito L. A survey on Hilbert-Huang transform: Evolution, challenges and solutions. *Digit. Signal Process.* 2022. No. 120. P. 103292.
11. Hlubina P., Luňáček J., Ciprian D., Chlebus R. Windowed Fourier transform applied in the wavelength domain to process the spectral interference signals. *Opt. Commun.* 2008. No. 281. P. 2349—2354.
12. Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.C., Tung C.C., Liu H.H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. R. Soc. Lond. A Math. Phys. Eng. Sci.* 1998. No. 454. P. 903—995.
13. Kemaio Q. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis. *Appl. Opt.* 2004. No. 43. P. 2695—2702.
14. Kumar A. Wavelet signal processing: A review for recent applications. *Int. J. Eng. Tech.* 2020. No. 6. P. 12.
15. Li M., Liu Y., Zhi S., Wang T., Chu F. Short-time Fourier transform using odd symmetric window function. *J. Dyn. Monit. Diagn.* 2022. No. 1. P. 37—45.
16. Lauterborn W., Cramer E. Subharmonic route to chaos observed in acoustics. *Phys. Rev. Lett.* 1981. No. 47. P. 1445.
17. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*, 3rd ed.; Academic Press: Burlington, MA, USA, 1999.
18. Mertins, A. *Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications*. Wiley: Chichester, UK, 1999.
19. Nigmatullin R.R., Alexandrov V., Agarwal P., Shilpi J., Necati O. Description of Multi-Periodic Signals Generated By Complex Systems: NOCFASS — New Possibilities of the Fourier Analysis. *Numerical Algebra, Control and Optimization.* March 2024. Vol. 14. No. 1. P. 1—19. DOI: 10.3934/naco.2022008
20. Peng Z.K., Peter W.T., Chu F.L. A comparison study of improved Hilbert-Huang transform and wavelet transform: Application to fault diagnosis for rolling bearing. *Mech. Syst. Signal Process.* 2005. No. 19. P. 974—988.
21. Portnoff M. Time-frequency representation of digital signals and systems based on short-time Fourier analysis. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* 1980. No. 28. P. 55—69.
22. Qian S., Chen D. Discrete Gabor transform. *IEEE Trans. Signal Process.* 1993. No. 41. P. 2429—2438.
23. Qian S., Chen, D. Joint time-frequency analysis. *IEEE Signal Process. Mag.* 1999. No. 16. P. 52—67.
24. Sejdić E., Djurović I., Stanković L. Fractional Fourier transform as a signal processing tool: An overview of recent developments. *Signal Process.* 2011. No. 91. P. 1351—1369.
25. Su X., Tao R., Kang X. Analysis and comparison of discrete fractional Fourier transforms. *Signal Process.* 2019 No. 160. P. 284—298.
26. Wilden I., Herzel H., Peters G., Tembrock G. Subharmonics, biphonation, and deterministic chaos in mammal vocalization. *Bioacoustics* 1998. No. 9. P. 171—196.
27. Wu Z., Huang N.E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method. *Adv. Adapt. Data Anal.* 2009. No. 1. P. 1—41.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ / GEOPHYSICAL METHODS OF PROSPECTING AND EXPLORATION

28. Yan R., Gao R.X., Chen X. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications. *Signal Process.* 2014. No. 96. P. 1—15.
29. Yao J., Krolak P., Steele C. The generalized Gabor transform. *IEEE Trans. Image Process.* 1995. No. 4. P. 978—988.
30. Zayed A.I. Hilbert transform associated with the fractional Fourier transform. *IEEE Signal Process. Lett.* 1998. No. 5. P. 206—208.
31. Zhao Z., Tao R., Li G., Wang, Y. Clustered fractional Gabor transform. *Signal Process.* 2020. No. 166. P. 107240.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Нигматуллин Р.Р. — внес вклад в разработку концепции статьи, подобрал математический аппарат для обеспечения расчетов, указанных в статье, присоединился к подготовке текста статьи, окончательно утвердил публикуемую версию и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Белов А.П. — внес основной вклад в разработку концепции статьи, присоединился к подготовке текста статьи, окончательно утвердил публикуемую версию и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работ.

Ерохин А.М. — внес основной вклад в разработку концепции статьи, присоединился к подготовке текста статьи, окончательно утвердил публикуемую версию и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работ.

Петров А.В. — внес основной вклад в разработку концепции статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Raoul R. Nigmatullin — contributed to the development of the concept of the article, selected a mathematical apparatus to ensure the calculations specified in the article, joined the preparation of the text of the article, finally approved the published version and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Alexey P. Belov — made the main contribution to the development of the concept of the article, joined the preparation of the text of the article, finally approved the published version and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Alexandr M. Erokhin — made the main contribution to the development of the concept of the article, joined the preparation of the text of the article, finally approved the published version and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Alexey V. Petrov — made the main contribution to the development of the concept of the article, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Нигматуллин Равиль Рашидович — доктор физико-математических наук, профессор ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет» им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ).

10, ул. К. Маркса, г. Казань 420111, Россия

e-mail: renigmat@gmail.com

SPIN-код: 5838-3495

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2931-4428>

Белов Алексей Павлович — кандидат геолого-минералогических наук, доцент ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

e-mail: belovap@mgri.ru

тел.: +7 (495) 255-15-10, доб. 21-52

SPIN-код: 1910-7536

ORCID: <https://orcid.org/0009-00005-0083-9441>

Raoul R. Nigmatullin — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor at Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KNRTU-KAI).

10 K. Marx str., Kazan 420111, Russia

e-mail: renigmat@gmail.com

SPIN-code: 5838-3495

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2931-4428>

Alexey P. Belov — Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Assoc. Prof. of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: belovap@mgri.ru

tel.: +7 (495) 255-15-10, ext. 21-52

SPIN-code: 1910-7536

ORCID: <https://orcid.org/0009-00005-0083-9441>

Ерохин Александр Михайлович* — заместитель начальника управления ИТ по научно-исследовательской работе ООО «Петровайзер».
4, корп. 2, Макарова ул., г. Тверь 170002, Россия
e-mail: erokhin_am@petroviser.ru
тел.: + 7 (915) 724-82-76
SPIN-код: 2110-5661
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9772-1821>

Петров Алексей Владимирович — доктор физико-математических наук, профессор факультета геологии и геофизики нефти и газа ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: petrovstud@mail.ru
тел.: +7 (916) 604-55-01
SPIN-код: 6200-2084
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3283-7495>

Alexandr M. Erokhin — Deputy Head of the IT Department for Research and Development at Petroviser LLC.
4, bldg. 2, Makarova str., Tver, 170002, Russia
e-mail: erokhin_am@petroviser.ru
tel.: + 7 (915) 724-82-76
SPIN- code: 2110-5661
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9772-1821>

Alexey V. Petrov — Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Faculty of Geology and Geophysics of Oil and Gas, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Exploration University.
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: petrovstud@mail.ru
tel.: +7 (916) 604-55-01
SPIN-code: 6200-2084
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3283-7495>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author