

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ
СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Научная статья
УДК 629.5.083.5
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/51-62>

Исследование и локализация неисправностей электродвигателя насоса по виброакустическим сигналам, обработанным методом дискретного вейвлет-преобразования

Владимир Иванович Короченцев, Валентин Вадимович Рыжих✉

Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация
✉ ryzhikh.vv@dvfu.ru

Аннотация. В статье приведены исследования вейвлет-скейлограмм виброакустического сигнала, работающего без нагрузки электродвигателя ДМН180L2 пожарного насоса, в динамике вращения, для оценки параметров диагностических признаков неисправностей, выявленных при работе механизма. Измерения проведены на подшипниковых щитах электродвигателя в радиальном и осевом направлениях.

Ключевые слова: вибродиагностика, судоремонт, дискретное вейвлет-преобразование, вейвлет-скейлограмма, виброметр, акселерометр

Для цитирования: Короченцев В.И., Рыжих В.В. Исследование и локализация неисправностей электродвигателя насоса по виброакустическим сигналам, обработанным методом дискретного вейвлет-преобразования // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 51–62.

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION
OF SHIPBUILDING PRODUCTION

Original article

Investigation and localization of pump electric motor faults using vibroacoustic signals processed by discrete wavelet transform

Vladimir I. Korochentsev, Valentin V. Ryzhikh✉

Far Eastern Federal University,
Vladivostok, Russian Federation,
✉ ryzhikh.vv@dvfu.ru

Abstract. The article presents research on wavelet scalograms of vibroacoustic signals from the unloaded DMN180L2 fire pump electric motor during rotational dynamics. The study aims to assess diagnostic parameters of faults identified during the operation of the mechanism. Measurements were conducted on the bearing housings of the electric motor in both radial and axial directions.

Keywords: vibration diagnostics, ship repair, discrete wavelet transform, wavelet scalogram, vibrometer, accelerometer

For citation: Korochentsev V.I., Ryzhikh V.V. Investigation and localization of pump electric motor faults using vibroacoustic signals processed by discrete wavelet transform. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 51–62. (In Russ.).

Введение

Техническое диагностирование вибрационных характеристик судовых механизмов и машин играет важную роль в процессе судоремонта, поскольку вовремя выявленный дефект в оборудовании позволяет сократить сроки и стоимость ремонта. Также позволяет повысить качество за счёт проведения вибрационного контроля на разных этапах ремонта, вплоть до сдаточных испытаний, и в большинстве случаев избежать рекламаций от заказчика.

1. Обзор методов анализа

Судовой насос представляет собой ключевой механизм для перекачивания жидкостей на судах и подвергается значительным вибрационным нагрузкам в процессе эксплуатации. Эти нагрузки могут быть вызваны как нормальными условиями работы, так и различными неисправностями, возникающими в электродвигателе или других элементах конструкции насоса. Для своевременной диагностики состояния оборудования важно применять методы анализа, способные эффективно выявлять и оценивать признаки дефектов на основе измерений вибраций.

Одним из наиболее перспективных методов диагностики является вейвлет-анализ (1), результатом непрерывного вейвлет-преобразования одномерного числового ряда (сигнала) является двумерный массив амплитуд – значений коэффициентов $C(a,b)$:

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) |a|^{-1/2} \psi_0 \left[\left(\frac{t-b}{a} \right) \right] dt, \quad (1)$$

где $s(t)$ – сигнал;
 Ψ – базисная функция вейвлета;
 a – временной масштаб;
 b – временная локализация.

Распределение этих значений в пространстве (a, b) даёт информацию об изменении относительного вклада вейвлетных компонент разного масштаба во времени и называется спектром коэффициентов вейвлет-преобразования, масштабно-временным (частотно-временным) спектром, вейвлет-спектром (wavelet spectrum) и скейлограммой. Вейвлет-анализ отличается высокой чувствительностью к нестационарным и кратковременным сигналам. В отличие от традиционных спектральных методов (например, преобразования Фурье), вейвлет-анализ позволяет одновременно анализировать временные и частотные характеристики сигнала. Это особенно важно для выявления локализованных аномалий, таких как импульсы, шумы или внезапные изменения параметров вибраций, которые часто характеризуют неисправности электродвигателя или редуктора насоса.

Для проведения вейвлет-анализа необходимо выбрать подходящий материнский вейвлет – функцию, которая определяет базис для разложения сигнала. Выбор конкретного типа материнского вейвлета зависит от особенностей анализируемого сигнала и целей исследования. Часто применяются такие классы вейвлетов, как «мексиканская шляпа», вейвлет Гаусса или вейвлет Морле, каждый из которых обладает уникальными свойствами для решения различных задач. Рассмотрим их подробнее.

Вейвлет Морле (Morlet)

$$\psi(t) = \exp^{-\left(\frac{t^2}{2}\right)} \cos(5t) \quad (2)$$

Обладает высокой разрешающей способностью как во временной, так и в частотной областях (рис. 1), что делает его идеальным для анализа нестационарных сигналов с преобладанием гармонических составляющих. Благодаря своей осциллирующей природе, этот вейвлет отлично выявляет периодические или почти периодические компоненты сигнала, имеет хорошо локализованный спектр, что помогает эффективно отделять различные частотные компоненты сигнала.

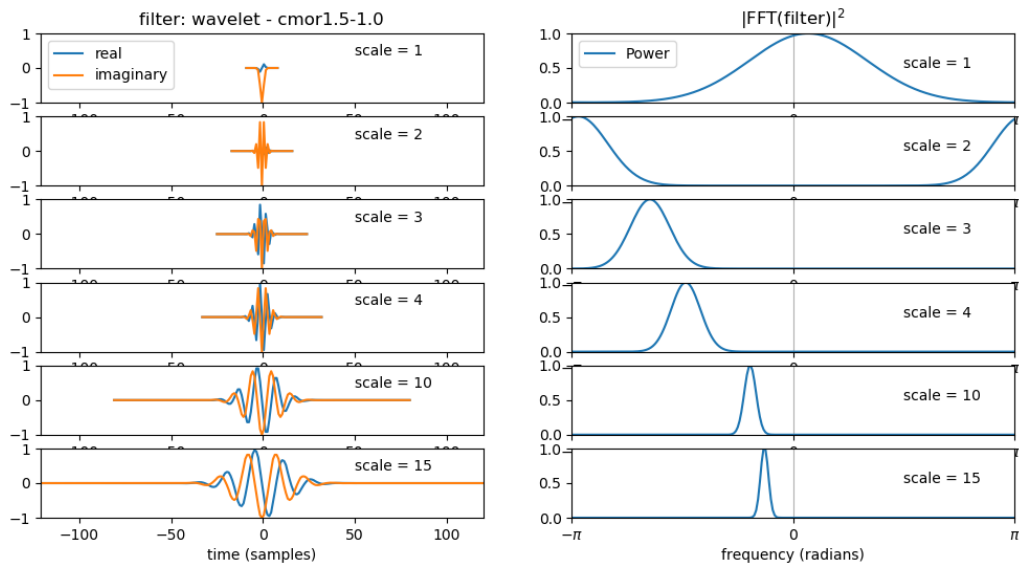


Рис. 1. Графическое изображение вейвлета Морле во временной и частотной областях

Fig. 1. Graphical representation of the Morlaix wavelet in the time and frequency domains

«Мексиканская шляпа» (“Mexican Hat”)

Является одним из наиболее популярных материнских вейвлетов, широко используемых в различных областях, включая вибродиагностику. Его название происходит от характерной формы графика функции, напоминающей традиционную мексиканскую шляпу. Математически вейвлет «мексиканская шляпа» представляет собой вторую производную от гауссовой функции (3).

$$\psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3^4\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) (1 - t^2) \quad (3)$$

Этот вейвлет обладает хорошей локализацией как во временной, так и в частотной областях (рис. 2), что позволяет эффективно анализировать сигналы, содержащие как медленно меняющиеся, так и быстрые компоненты. Благодаря своей форме он отлично выявляет резкие изменения или импульсы в сигнале, что особенно важно для диагностики механических систем, где такие события могут указывать на неисправности.

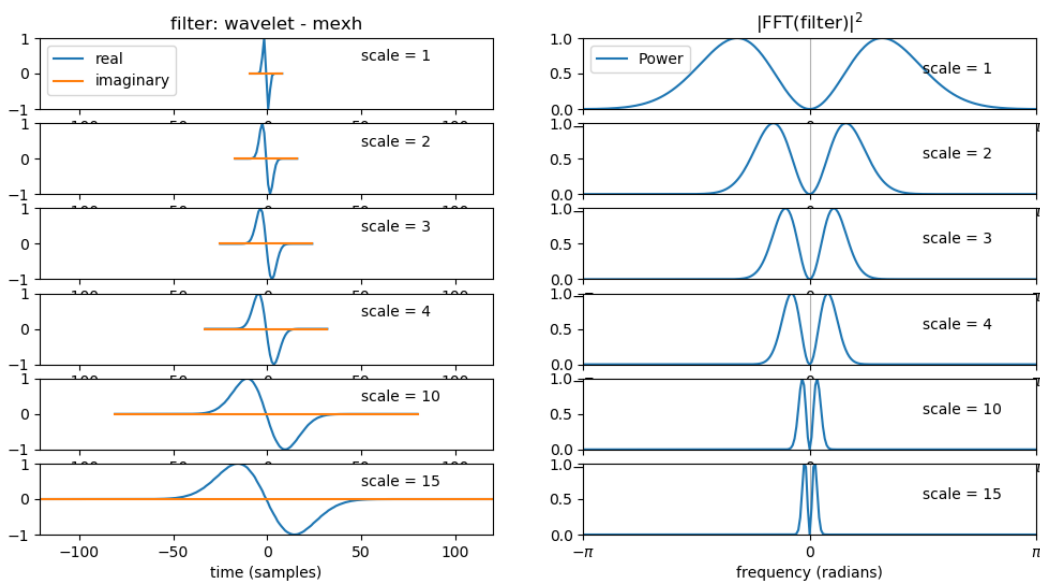


Рис. 2. Графическое изображение вейвлета «мексиканская шляпа» во временной и частотной областях

Fig. 2. Graphical representation of the “Mexican Hat” wavelet in the time and frequency domains

Многие механические неисправности, такие как повреждения подшипников, трещины на деталях или удары при работе, вызывают резкие импульсы в вибрационном сигнале. Вейвлет «мексиканская шляпа» способен эффективно выделять эти импульсы благодаря своей чувствительности к резким изменениям.

Вейвлет Гаусса (Gauss)

Представляет собой математическую функцию, которая является производной от гауссова распределения.

$$\psi(t) = C \exp^{-t^2} \exp^{-jt} \quad (4)$$

В вибродиагностике этот тип вейвлета используется для анализа сигналов, характеризующихся гладкими изменениями и низкой частотой шумов. Вейвлет Гаусса обладает бесконечно дифференцируемыми свойствами, что делает его подходящим для анализа гладких сигналов.

Он обеспечивает хорошую локализацию в частотной области, что полезно для выявления гармонических составляющих сигнала. Вейвлет Гаусса особенно (рис. 3) эффективен при работе с низкочастотными вибрационными сигналами, которые характерны для крупных механических систем, таких как судовые двигатели, турбины или насосы. Его способность к детальному анализу гармонических составляющих позволяет выявить даже слабые периодические компоненты в сигнале.

Некоторые дефекты, такие как трещины или износ подшипников, могут проявляться в виде плавных изменений вибрационного сигнала. Вейвлет Гаусса отлично справляется с детектированием таких изменений, поскольку он чувствителен к градиентам и производным сигнала.

Благодаря своей гладкой форме вейвлет Гаусса эффективно фильтрует высокочастотные шумы, сохраняя при этом важные информационные компоненты сигнала. Это особенно важно при работе с реальными измерительными данными, которые часто зашумлены.

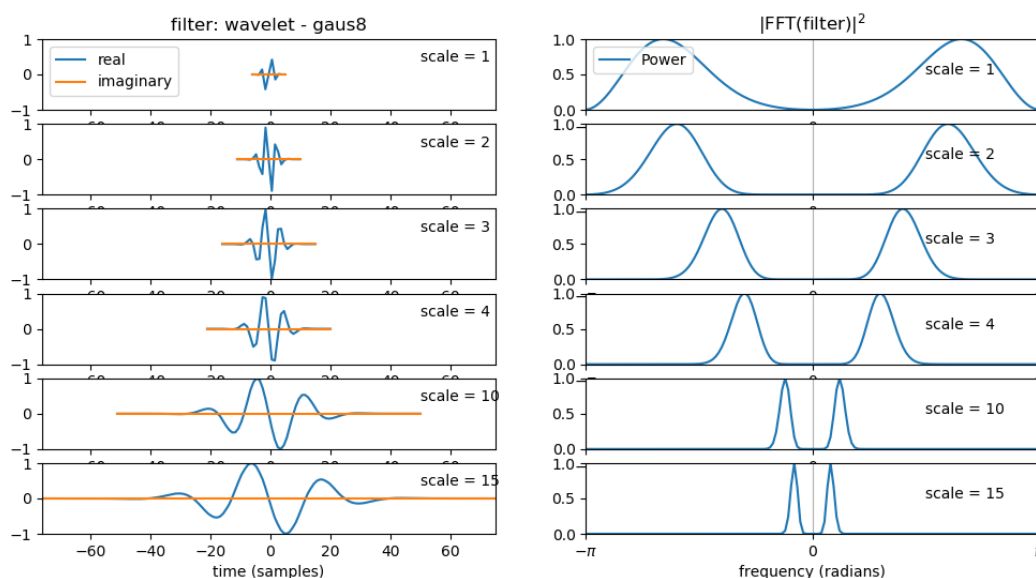


Рис. 3. Графическое изображение вейвлета Гаусса во временной и частотной областях

Fig. 3. Graphical representation of the Gauss wavelet in the time and frequency domains

Преимущества вейвлет-анализа для диагностики электродвигателя:

1. Высокая чувствительность к переходным процессам и ударам.
2. Возможность анализа временно-частотной динамики, что важно для диагностики механизмов, работающих с переменной нагрузкой.
3. Простота интеграции в существующие системы диагностики.

Таким образом, вейвлет-анализ является важным инструментом вибродиагностики электродвигателей, приводящих в движение различные механизмы, в т.ч. насосы, позволяя эффективно выявлять дефекты и прогнозировать их развитие.

2. Цели статьи:

1. Исследование применения вейвлет-скейлограмм для анализа виброакустического сигнала, получаемого с работающего без нагрузки электродвигателя ДМН180L2 пожарного насоса, с целью выявления диагностических признаков неисправностей.
2. Оценка динамики вибраций в вертикальном и продольном направлениях на подшипниковых щитах двигателя для определения потенциала вейвлет-методов в обнаружении дефектов и аномалий в работе механизма.
3. Оценка методов анализа вибрационных данных для повышения точности диагностики и мониторинга состояния электродвигателей на основе вейвлет-анализа.
4. Выявление характерных особенностей вибрационных сигналов, связанных с ударными звуками, исходящими от кормового подшипника электродвигателя. Сравнительный анализ с использованием различных материнских вейвлетов позволяет определить наиболее эффективный подход для диагностики неисправностей, а также проанализировать эволюцию параметров сигнала во времени и частоте.

3. Проведение измерений

Измерение вибрационных параметров электродвигателя осуществляется в соответствии с нормативными требованиями, установленными в «Правилах классификации и постройки морских судов» Российского морского регистра судоходства (РМРС). Точки измерения вибрации изображены на рисунке 4.

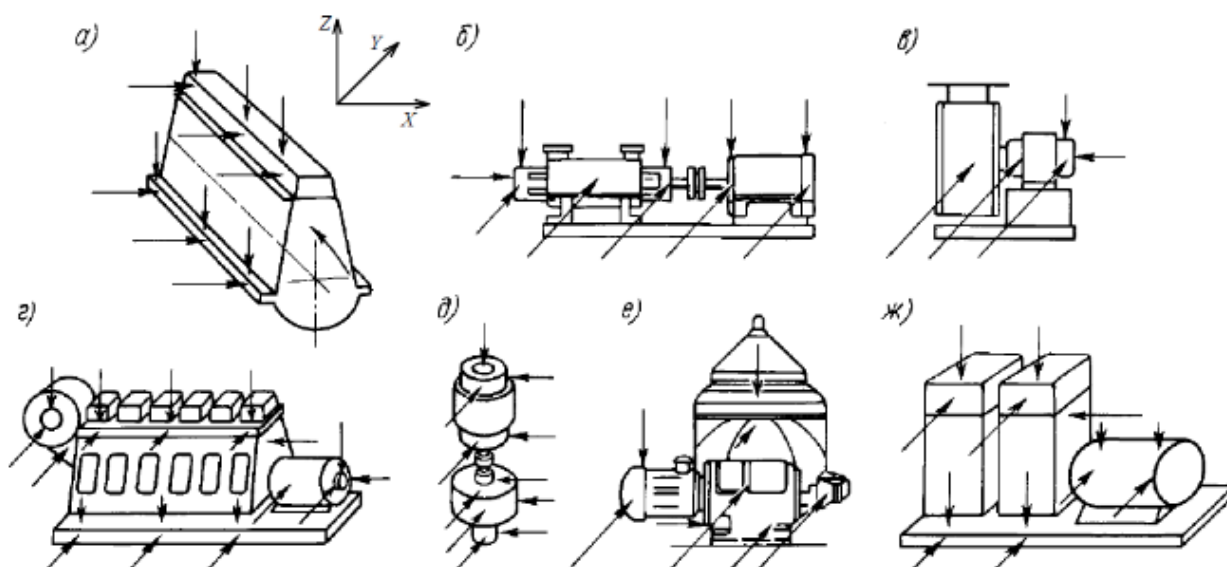


Рис. 4. Точки измерения вибрации:

**а – двигатель внутреннего сгорания; б – горизонтальный насос; в – вентилятор;
г – дизель-генератор; д – вертикальный насос; е – сепаратор; ж – поршневой компрессор.**
Стрелками указаны точки и направления измерения вибрации

Fig. 4. Vibration measurement points: а – internal combustion engine; б – horizontal pump;
в – fan; г – diesel generator; д – vertical pump; е – separator; ж – reciprocating compressor.

The arrows indicate the points and directions of vibration measurement.

При проведении измерений использовались пьезоэлектрические датчики ускорения ИСР (акселерометры) модели АС102-1А, расположенные на подшипниковых щитах в вертикальном и осевом направлениях при устойчивой работе электродвигателя ДМН180L2,

жёстко закреплённого на фундаменте без насоса. В двигателе установлены подшипники типа 311. Сигнал с датчиков поступает в шумомер-виброметр, анализатор спектра «ЭКОФИЗИКА-110А», в нём сигналы с датчиков записываются и сохраняются для последующей обработки.

4. Обработка данных

В ходе исследования использовались данные вибрационных сигналов, полученные с трёх акселерометров, установленных на корпусе электродвигателя. Сигналы ускорения регистрировались при помощи шумомера-виброметра и анализатора спектра «ЭКОФИЗИКА-110А». Запись осуществлялась синхронно по трём каналам с частотой дискретизации 12 кГц и разрядностью 16 бит для каждого канала, что обеспечивало высокую точность цифрового представления измеряемых сигналов.

Для проведения вейвлет-анализа была разработана специальная программа на языке программирования Python, использующая библиотеку PyWavelets (PyWT). Данная программа позволяет строить скейлограммы вибрационных сигналов, что значительно облегчает интерпретацию результатов и выявление характерных особенностей сигнала во временной и частотной областях. Программа была специально адаптирована автором для исследовательских целей и обеспечивает возможность применения различных материнских вейвлетов для детального анализа сигналов.

Во время проведения эксперимента были отмечены органолептически различимые ударные звуки, исходящие со стороны кормового подшипника электродвигателя. Эти звуки, предположительно, связаны с наличием локальных дефектов или неисправностей в рассматриваемом узле. Для дальнейшего исследования данных записанных сигналов был применён метод вейвлет-преобразования, который позволяет эффективно анализировать нестационарные процессы и выявлять локальные изменения в структуре сигнала.

Для анализа вибрационных сигналов использовались три различных материнских вейвлета: «мексиканская шляпа» (“Mexican Hat”), вейвлет Морле (Morlet) и вейвлет Гаусса (Gaussian).

Каждый из выбранных материнских вейвлетов применялся для построения скейлограмм, что позволило провести сравнительный анализ и оценить способность различных типов вейвлетов выявлять особенности вибрационных сигналов, связанные с возможными дефектами электродвигателя.

5. Результаты измерений и их обсуждение

Проведённый эксперимент позволил зафиксировать вибрационные сигналы с трёх датчиков, установленных на корпусе электродвигателя. Анализ записанных данных показал наличие как периодических, так и импульсных компонент в сигнале. Органолептически различимые ударные звуки, исходящие со стороны кормового подшипника, нашли своё отражение в зарегистрированных временных рядах.

Для детального анализа использовались три различных материнских вейвлета: «мексиканская шляпа», вейвлет Морле и вейвлет Гаусса. Каждый из них позволил выявить уникальные особенности структуры вибрационного сигнала.

5.1 Анализ скейлограмм

Скейлограмма с использованием вейвлета Морле

Скейлограммы, построенные с помощью вейвлета Морле, наглядно демонстрируют гармонические составляющие сигнала: рисунок 5 – для точки измерения в вертикальном направлении на кормовом подшипнике (точка 1), рисунок 6 – для точки измерения в продольном направлении на кормовом подшипнике (точка 2) и рисунок 7 – для точки измерения в вертикальном направлении на носовом подшипнике (точка 3).

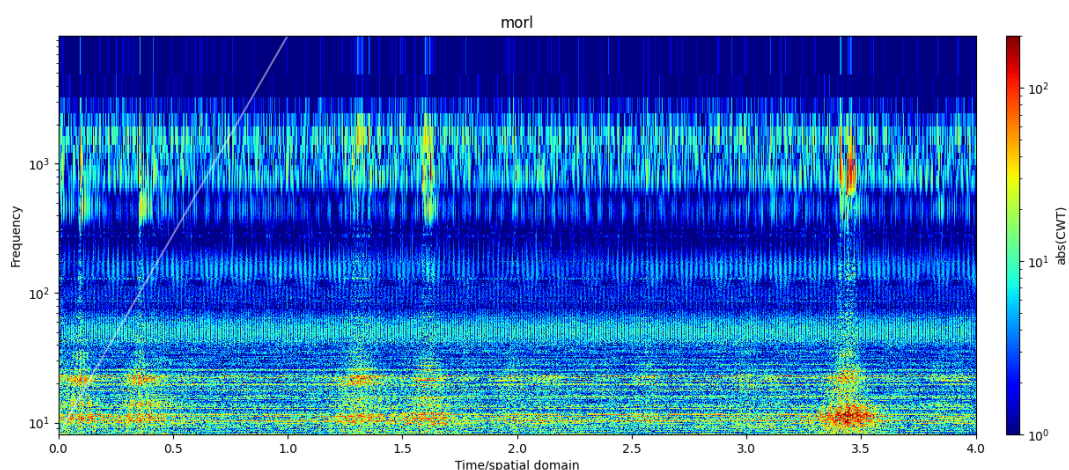


Рис. 5. Скейлограмма с использованием вейвлета Морле точки 1 в вертикальном направлении на кормовом подшипнике электродвигателя

Fig. 5. A scalogram using the Morlaix wavelet of point 1 in the vertical direction on the aft bearing of the electric motor

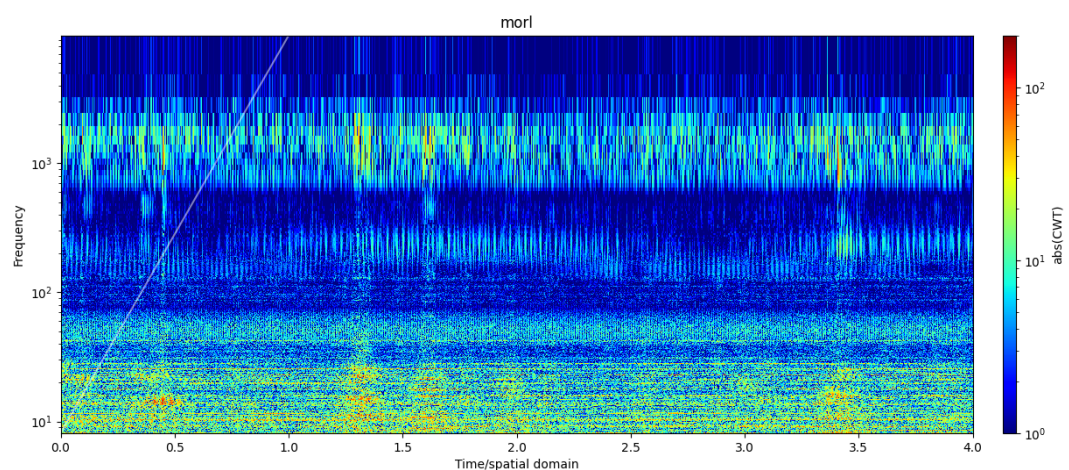


Рис. 6. Скейлограмма с использованием вейвлета Морле точки 2 в продольном направлении на кормовом подшипнике электродвигателя

Fig. 6. A scalogram using the Morlaix wavelet of point 2 in the longitudinal direction on the aft bearing of the electric motor

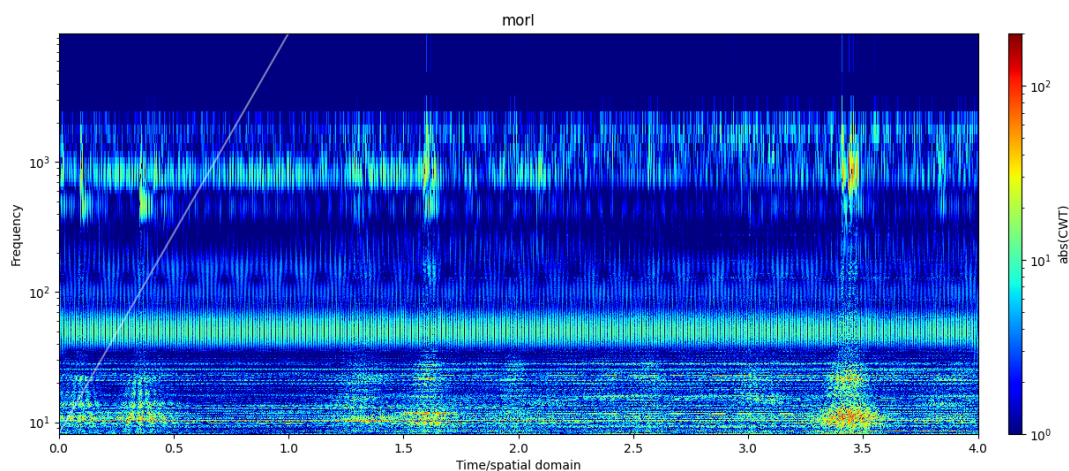


Рис. 7. Скейлограмма с использованием вейвлета Морле точки 3 в вертикальном направлении на носовом подшипнике электродвигателя

Fig. 7. A scalogram using the Morlaix wavelet of point 3 in the vertical direction on the nose bearing of the electric motor

На скейлограмме, построенной с использованием вейвлета Морле, чётко выделяются частотные компоненты, соответствующие основной частоте вращения ротора ($f_{rotor} = 50$ Гц) и её гармоникам ($2f_{rotor}$, $3f_{rotor}$, ...). Эти спектральные линии являются характерными для нормального режима работы электродвигателя и отражают регулярные процессы, связанные с вращением ротора.

Однако анализ спектра также выявил дополнительные частотные компоненты, расположенные вне основных гармонических составляющих. Среди них можно отметить следующие:

- частота перекачивания шариков по наружному кольцу подшипника ($f_{BPFO} = 247$ Гц),
- частота перекачивания шариков по внутреннему кольцу подшипника ($f_{BPFI} = 152$ Гц),
- сепараторная частота ($f_{FTF} = 31$ Гц),
- частота вращения шарика относительно корпуса подшипника ($f_{BSF} = 161,8$ Гц).

Наличие этих частотных компонент в спектре само по себе не обязательно свидетельствует о наличии механических повреждений. Такие частоты могут быть естественными спутниками нормальной работы подшипников качения и возникать даже при отсутствии дефектов. Ключевым индикатором наличия реальных повреждений являются импульсные возмущения, которые наблюдаются на скейлограммах в виде локальных пиков или модуляций сигнала.

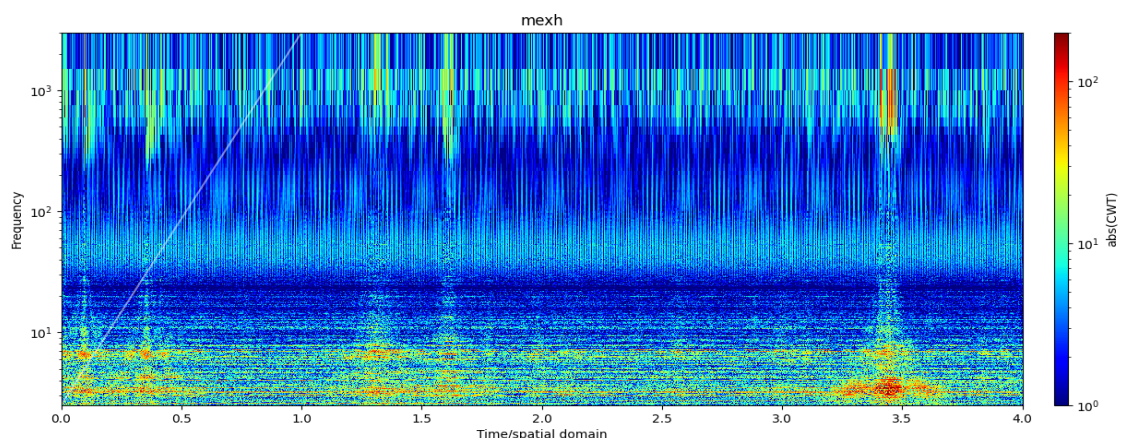


Рис. 8. Скейлограмма с использованием вейвлета «мексиканская шляпа» точки 1 в вертикальном направлении на кормовом подшипнике электродвигателя

Fig. 8. A scalogram using the "Mexican Hat" wavelet of point 1 in the vertical direction on the aft bearing of the electric motor

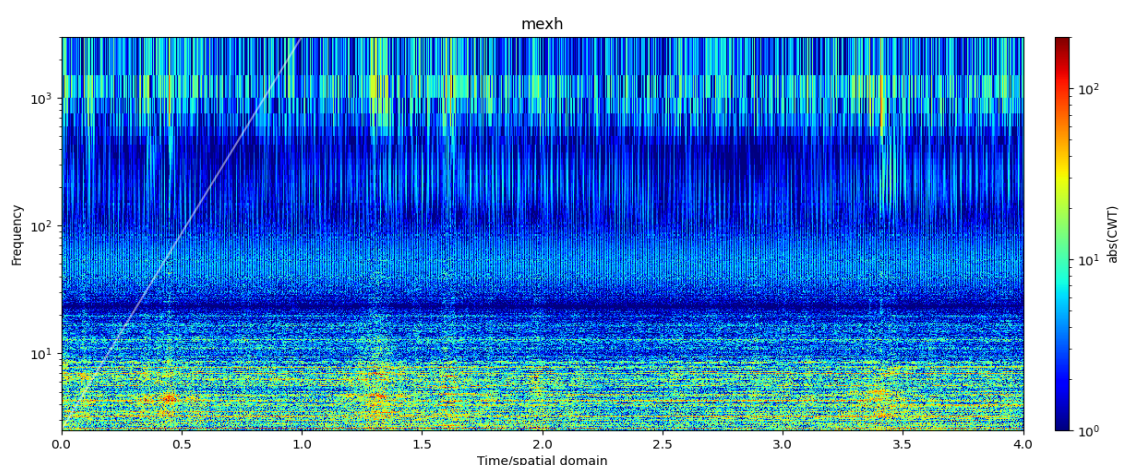


Рис. 9. Скейлограмма с использованием вейвлета «мексиканская шляпа» точки 2 в осевом направлении на кормовом подшипнике электродвигателя

Fig. 9. A scalogram using the "Mexican Hat" wavelet of point 2 in the axial direction on the aft bearing of the electric motor

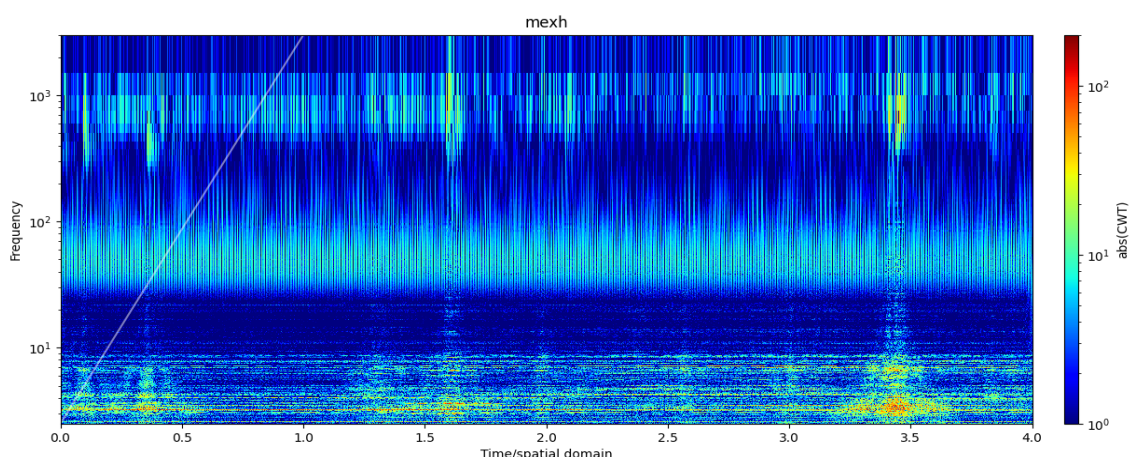


Рис. 10. Скейлограмма с использованием вейвлета «мексиканская шляпа» точки 3 в вертикальном направлении на носовом подшипнике электродвигателя

Fig. 10. A scalogram using the "Mexican Hat" wavelet of point 3 in the vertical direction on the nose bearing of an electric motor

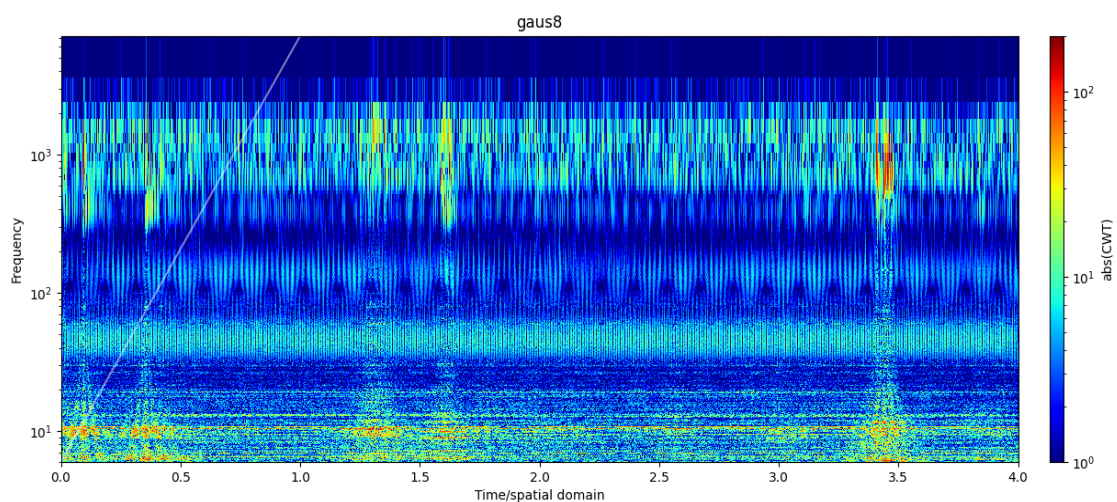


Рис. 11. Скейлограмма с использованием вейвлета Гаусса точки 1 в вертикальном направлении на кормовом подшипнике электродвигателя

Fig. 11. A scalogram using the Gauss wavelet of point 1 in the vertical direction on the aft bearing of the electric motor

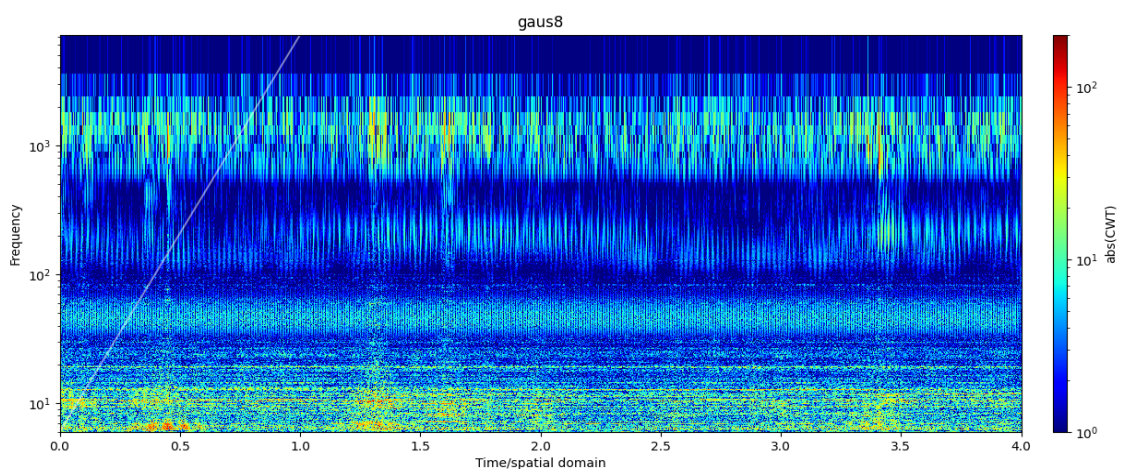


Рис. 12. Скейлограмма с использованием вейвлета Гаусса точки 2 в продольном направлении на кормовом подшипнике электродвигателя

Fig. 12. A scalogram using the Gauss wavelet of point 2 in the longitudinal direction on the aft bearing of the electric motor

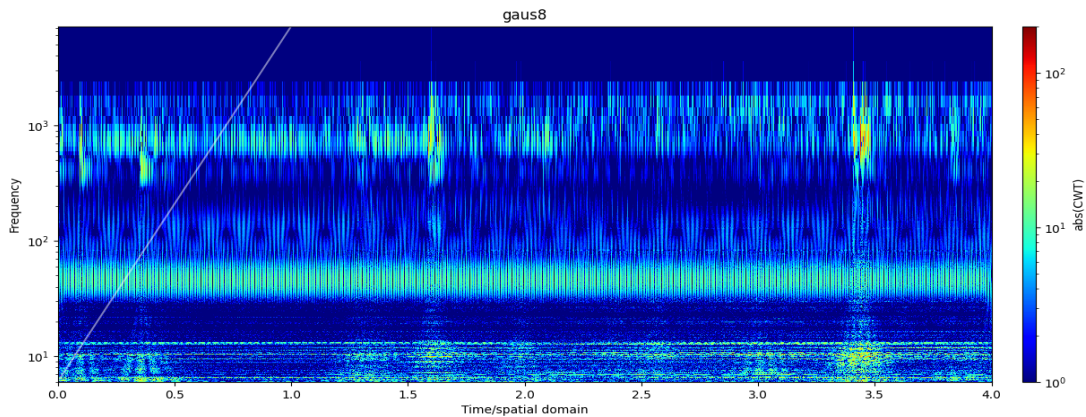


Рис. 13. Скейлограмма с использованием вейвлета Гаусса точки 3 в вертикальном направлении на носовом подшипнике электродвигателя

Fig. 13. A scalogram using the Gauss wavelet of point 3 in the vertical direction on the nose bearing of the electric motor

При детальном анализе скейлограммы, построенной с использованием вейвлета «мексиканская шляпа» (рис. 8, 9, 10), были выявлены характерные импульсные события, сосредоточенные во времени и частоте. Эти импульсы совпадают по временным интервалам с периодами, соответствующими частотам f_{BPFO} , f_{BPFI} , f_{FTF} и f_{BSF} , что позволяет предположить наличие дефектов в конструкции подшипника. Импульсные возмущения представляют собой явные признаки ударных процессов, вызванных, например, трещинами, выбоинами или другими механическими повреждениями элементов подшипника.

Анализ вибрационного сигнала с использованием вейвлета Морле (рис. 5, 6, 7) и вейвлета Гаусса (рис. 11, 12, 13) позволил выявить явление модуляции на частоте, соответствующей частоте вращения шариков подшипника (f_{BSF}). На скейлограмме эта модуляция проявляется в виде периодических изменений амплитуды спектральных компонент, сосредоточенных вокруг f_{BSF} и её гармоник. Данное явление наблюдается как регулярная вариация интенсивности сигнала во временной области.

При наличии органолептически различимых ударных звуков, исходящих со стороны кормового подшипника, выявление модуляции на частоте вращения шариков может быть связано с перекосом подшипника в подшипниковом щите. Перекос подшипника приводит к неравномерному распределению нагрузки между шариками и их контактными поверхностями, что вызывает следующие эффекты:

Неравномерный износ шариков и колец. Перекос создаёт условия для локального увеличения нагрузки на отдельные шарiki или участки колец, что может привести к появлению механических дефектов. Каждый контакт дефектного участка с противоположной поверхностью вызывает импульсную нагрузку, которая модулирует общий вибрационный сигнал на частоте f_{BSF} .

Изменение геометрии контакта. При перекосе изменяется форма зоны контакта между шариками и кольцевыми поверхностями, что приводит к возникновению дополнительных силовых компонент. Эти изменения проявляются как модуляция амплитуды на частоте вращения шариков (f_{BSF}) и её гармониках.

Резонансные явления в деформированной системе. Перекос подшипника может вызвать деформацию конструкции подшипникового щита, что приводит к изменению собственных частот системы. Если эти частоты совпадают с f_{BSF} или её гармониками, возникает резонанс, усиливающий модуляцию на данной частоте.

Таким образом, хотя наблюдение характерных частотных компонент может указывать на потенциальные области интереса, окончательный вывод о наличии дефектов должен основываться на анализе импульсных возмущений, выявляемых с помощью методов, чувствительных к локальным изменениям структуры сигнала, таких как вейвлет-анализ с использованием материнских вейвлетов типа «мексиканская шляпа» (рис. 8, 9, 10).

Заключение

Проведённое исследование продемонстрировало высокую эффективность метода вейвлет-анализа для диагностики вибрационных сигналов электродвигателя, особенно при выявлении нестационарных процессов и локальных дефектов. Использование различных материнских вейвлетов («мексиканская шляпа», вейвлет Морле и вейвлет Гаусса) позволило получить всестороннюю информацию о структуре сигнала, что существенно улучшило точность интерпретации результатов.

Выявление гармонических составляющих. Вейвлет Морле успешно выделил основные спектральные компоненты, связанные с частотой вращения ротора (frotor) и её гармониками. Дополнительно была зафиксирована модуляция на частоте вращения шариков подшипника (fBSF), что указывает на возможные проблемы с геометрической установкой подшипникового узла, такие как перекос подшипника.

Обнаружение импульсных событий. Применение вейвлета «мексиканская шляпа» позволило эффективно детектировать импульсные возмущения, связанные с характерными частотами подшипника (fBPFO, fBPFI, fFTF, fBSF). Эти данные служат ключевыми индикаторами наличия механических повреждений или неравномерного износа элементов подшипника.

Комплексный анализ дефектов. Сравнительный анализ результатов, полученных различными типами вейвлетов, позволил сделать вывод о наличии перекоса подшипника в подшипниковом щите, что подтверждается модуляцией амплитуды на частоте fBSF. Это подчёркивает важность использования комплексного подхода для точной диагностики состояния оборудования.

Практическая значимость. Полученные результаты имеют важное практическое значение для обеспечения надёжности работы судовых механизмов и вибродиагностики в судоремонте. Выявленные методы анализа могут быть использованы для внедрения систем мониторинга и прогнозирования отказов, что позволит оптимизировать режимы обслуживания и минимизировать риск аварийных ситуаций.

Таким образом, применение метода вейвлет-анализа с использованием различных материнских вейвлетов доказало свою применимость для решения задач вибродиагностики. Результаты исследования открывают перспективы для дальнейшего развития автоматизированных систем диагностики, основанных на современных методах цифровой обработки сигналов, включая машинное обучение и искусственный интеллект.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

В.И. Короченцев – разработка концепции и дизайна исследования; В.В. Рыжих – сбор данных; анализ и интерпретация результатов; подготовка и редактирование текста. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

V.I. Korochentsev – development of the concept and design of the study; V.V. Ryzhikh – data collection; analysis and interpretation of the results; preparation and editing of the text. All the authors have read and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов И.И. Вейвлет-анализ и мультифрактальная параметризация при оценке технического состояния цифровых систем: дисс. ... канд. техн. наук. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 150 с.
2. Подклетнов С.Г. Применение методов преобразования Фурье и вейвлет-преобразования для вибродиагностики технического состояния тоннельных эскалаторов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 5. С. 24–32. DOI: <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2023-16-5-24-32>

3. Стародубцев П.А., Дорофеев Г.В., Липовецкий А.О. Исследование параметров вибрации судовых конструкций вейвлет-анализом виброграмм // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2021. Т. 14, № 3. С. 307–317. DOI: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0307>
4. Яблоков А.Е., Жила Т.М. Применение СНС в вибродиагностике по спектрограммам и вейвлет-скалограммам сигнала // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 452–457.

REFERENCES

1. Ivanov I. I. Wavelet analysis and multifractal parametrization in assessing the technical condition of digital systems: Ph. D. thesis. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2013. 150 p. (In Russ.).
2. Podkletnov S.G. Application of Fourier transform and wavelet transform methods for vibration diagnostics of the technical condition of tunnel escalators. *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*, 2023, vol. 16, no. 5, pp. 24–32. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2023-16-5-24-32>
3. Starodubtsev P.A., Dorofeev G.V., Lipovetsky A.O. Investigation of vibration parameters of marine structures using wavelet analysis of vibragrams. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 307–317. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0307>
4. Yablokov A.E., Zhila T.M. Application of CNS in vibration diagnostics using spectrograms and wavelet scalograms of signals. *Izvestiya of Tula State University. Technical Sciences*, 2021, no. 12, pp. 452–457. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Короченцев Владимир Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ vkoroich@mail.ru

Vladimir I. Korochentsev, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Рыжих Валентин Вадимович – магистр, аспирант, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ ryzhikh.vv@dvfu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-5498-1487>

Valentin V. Ryzhikh, Master's Degree, Postgraduate student, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 20.02.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 14.05.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.