

УДК 622.69: 658.588.2: 51-7

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi65.135>

МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МОРСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ ПОСРЕДСТВОМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА СИГНАЛА ДИСТАНЦИОННОЙ МАГНИТОМЕТРИИ

В.А. Веселов

*Дальневосточный федеральный университет,
г. Владивосток, Россия*

В.В. Проботюк

*Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, Россия*

М.В. Китаев

*Дальневосточный федеральный университет,
г. Владивосток, Россия*

О.Э. Суров

*Дальневосточный федеральный университет,
г. Владивосток, Россия*

Аннотация. В работе рассмотрен метод выявления дефектов морских трубопроводов с помощью вейвлет-преобразования сигнала дистанционной магнитометрии. Данный метод позволяет облегчить и ускорить процесс обработки больших объемов информации, получаемых в результате измерений. Согласно статистике, от 40% до 50% аварий на морских трубопроводах происходят по причине коррозии стенок труб. В связи с этим исследования, направленные на разработку методов обследования и диагностики морских трубопроводов весьма актуальны. Для апробации предлагаемого метода выявления дефектов трубопроводов в программе инженерного анализа ELCUT была разработана численная модель, описывающая распределение магнитного поля в районе коррозионного пятна, расположенного на стенке трубы. Показано, что предложенный метод может быть использован для обнаружения дефектов и оценки технического состояния морских трубопроводов.

Ключевые слова: морские трубопроводы, коррозия, дефект, дистанционная магнитометрия, метод анализа, вейвлет-преобразование, неразрушающий контроль

Введение

Морские трубопроводы являются альтернативой судам при добыче и транспортировке природных углеводородов. Трубопроводы - это основа нефтедобывающей и перерабатывающей промышленности. Их классифицируют по разным признакам: способу прокладки, назначению, виду транспортируемого вещества, температуре транспортируемого вещества, давлению и др.

Морской трубопроводный транспорт требует постоянного мониторинга технического состояния и обслуживания для поддержания работоспособного состояния и обеспечения безопасности транспортировки сырья.

Газо- и нефтепроводы подвергаются различным нагрузкам, которые возникают вследствие внешних природно-климатических условий, агрессивности транспортируемого сырья и механических (циклических и ударных) воздействий. Это приводит к появлению напряженно-деформированных состояний, способных инициировать стресс-коррозионные процессы [1].

Объемы разлива нефти при аварийных утечках из подводных трубопроводов занимают второе место после разливов при авариях танкеров [2]. В работе [3] приво-

дится статистика аварийных ситуаций на морских трубопроводах в Мексиканском заливе и Северном море, согласно которой от 40 % до 50 % аварий происходит по причине коррозии стенок трубопроводов. Разлитая нефть является одним из самых опасных загрязнителей морской среды. За последние несколько десятилетий мировой прибрежный океан пострадал от многих катастрофических разливов нефти [4].

Множество аварийных ситуаций, происходящих по причине повреждений трубопроводов, может быть предупреждено благодаря вовремя проведенной диагностике и оценке технического состояния трубопроводов; соответственно, можно избежать расходов на ликвидацию последствий аварии и восстановление рабочего режима. Для диагностики применяются разные методы: ультразвуковой, акустико-эмиссионный, магнитный, вихретоковый и др. Использование такого разнообразия методов связано с различиями характеристик и назначения трубопроводов, условиями их эксплуатации. Очевидно, что метода, который мог бы дать полную и достоверную картину о техническом состоянии трубопровода, не существует. Проведение мероприятий по диагностике и обследованию трубопроводов затратно, так как зачастую необходимо изменение режима работы трубопровода или же полная остановка транспортировки, что приводит к значительным прямым и косвенным потерям. Поэтому вопрос об адаптации бесконтактного магнитометрического метода, не требующего вмешательства в процесс работы трубопровода, является достаточно актуальным [1].

Методы магниторазведки и магнитометрии в последние двадцать лет широко применяются при решении инженерных и геологических задач. В частности, задачи дефектоскопии инженерных сооружений, в том числе и трубопроводов, в которых используются сверхдетальные и высокоточные магнитные съёмки, занимают особое место [5].

В 2015 и 2016 гг. была испытана магнитометрическая система, которая дистанционно определяет пространственное положение заглубленных трубопроводов с помощью магнитной съёмки [6]. Это говорит о том, что дистанционная магнитометрия может успешно применяться для обследований морских трубопроводов.

Моделирование дефекта

Моделирование дефекта производилось в программе инженерного анализа – ELCUT. В качестве дефекта было принято коррозионное пятно шириной 1 м, глубиной 6 мм, при толщине стенки трубы в 12 мм (рис. 1). Магнитное поле в трубе статическое, материал трубы – сталь 09Г2С. Исходя из того, что магнитная проницаемость земли и воды составляют порядка единицы, а у металла, из которого изготовлена труба, много больше единицы, возникающей погрешностью искажения магнитного поля можно пренебречь. Следовательно, предлагаемый метод может применяться как для подземных, так и для морских трубопроводов [7].

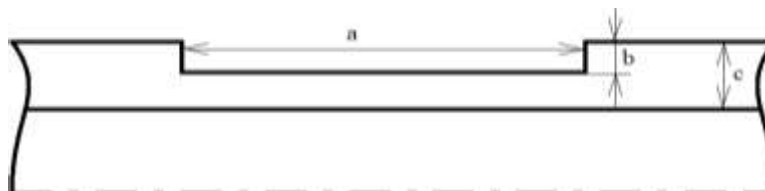


Рис.1. Модель коррозионного пятна: а – ширина пятна, b – глубина пятна, с – толщина стенки трубы.

Как видно из рисунка 2, на котором изображено распределение силовых линий напряженности магнитного поля, над пятном происходит выпучивание магнитного поля. Горизонтальная линия – это некий фиктивный контур, проведенный на высоте 1 м от трубы, вдоль которого считывались значения горизонтальной и вертикальной составляющей напряженности магнитного поля.

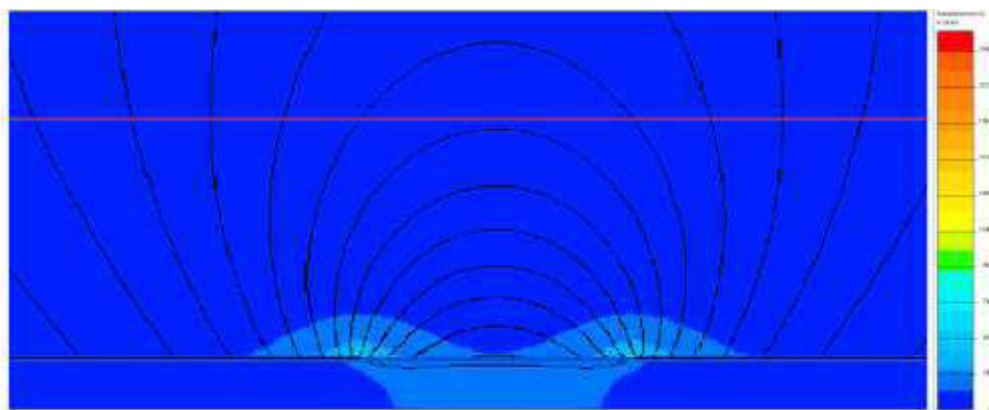


Рис. 2. Распределение силовых линий напряженности магнитного поля над коррозионным пятном

На рисунках 3-8 представлены графики значений вертикальной и горизонтальной составляющих напряженности магнитного поля, которые представляют собой отклики, с помощью которых выявляется моделируемый дефект. Отметим, что представленные графики напоминают семейство базовых вейвлетов Гаусса, так как отклик вертикальной составляющей похож на вейвлет Гаусса первого порядка, а отклик горизонтальной составляющей похож на вейвлет Гаусса второго порядка. Следовательно, для выявления дефекта на магнитограмме использованы именно эти вейвлеты. Следует заметить, что вид кривой на графиках не зависит от расстояния между трубой и линией контура, так же как и от геометрических параметров дефекта - меняется только масштаб кривой.

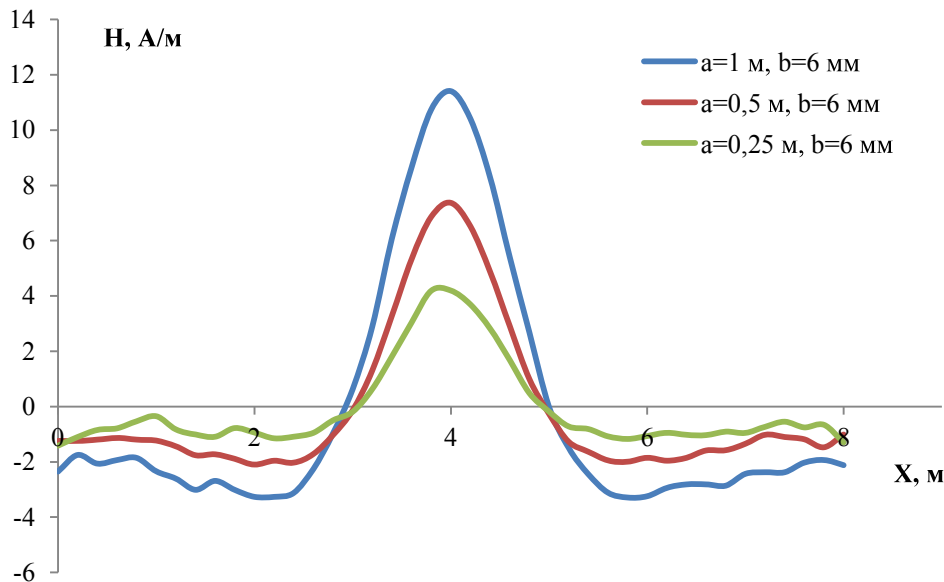
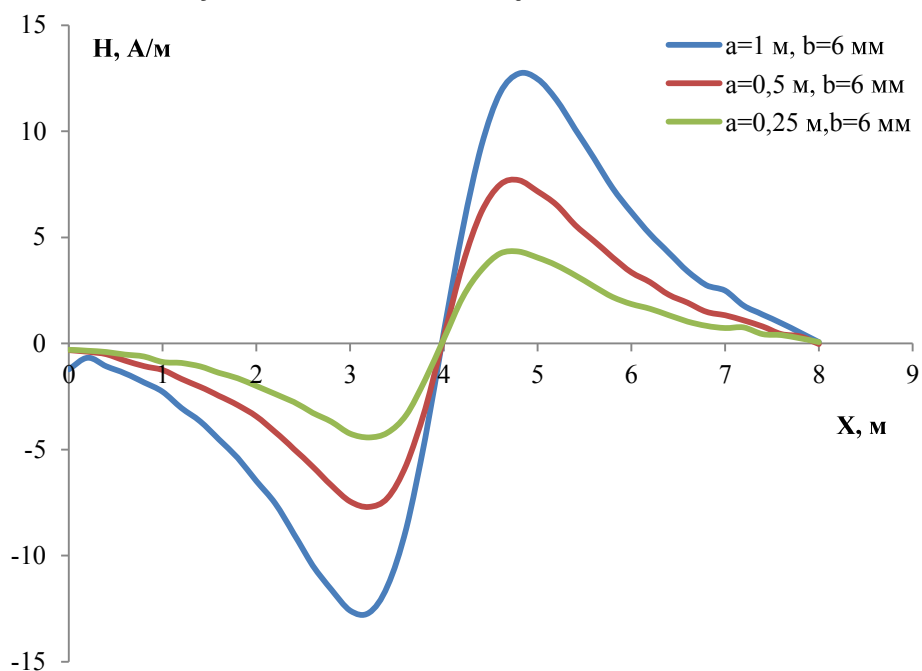


Рис.3. Значения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля, считанные на расстоянии 1 м над коррозионным пятном, имеющим различную ширину a и постоянную глубину b .

Рис.4. Значения вертикальной составляющей напряженности магнитного поля, считанные на



расстоянии 1м над коррозионным пятном, имеющим различную ширину a и постоянную глубину b .

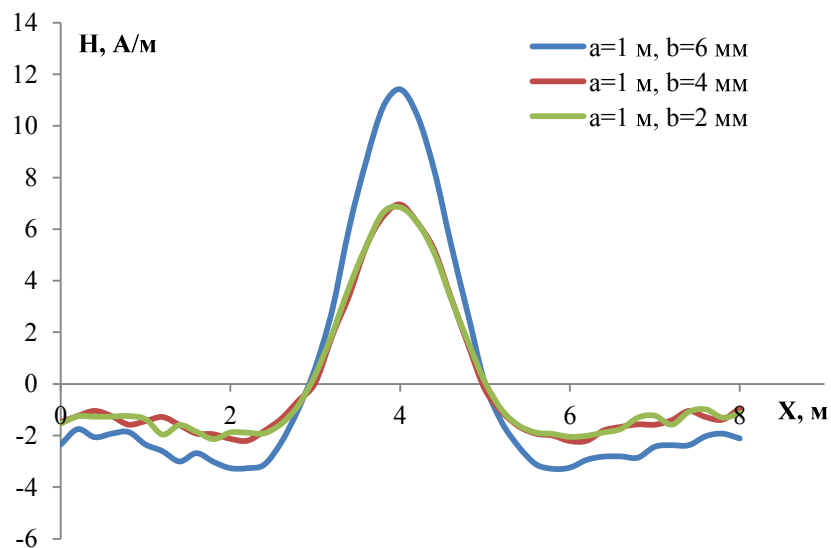


Рис.5. Значения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля, считанные на расстоянии 1м над коррозионным пятном, имеющим различную глубину b и постоянную ширину a .

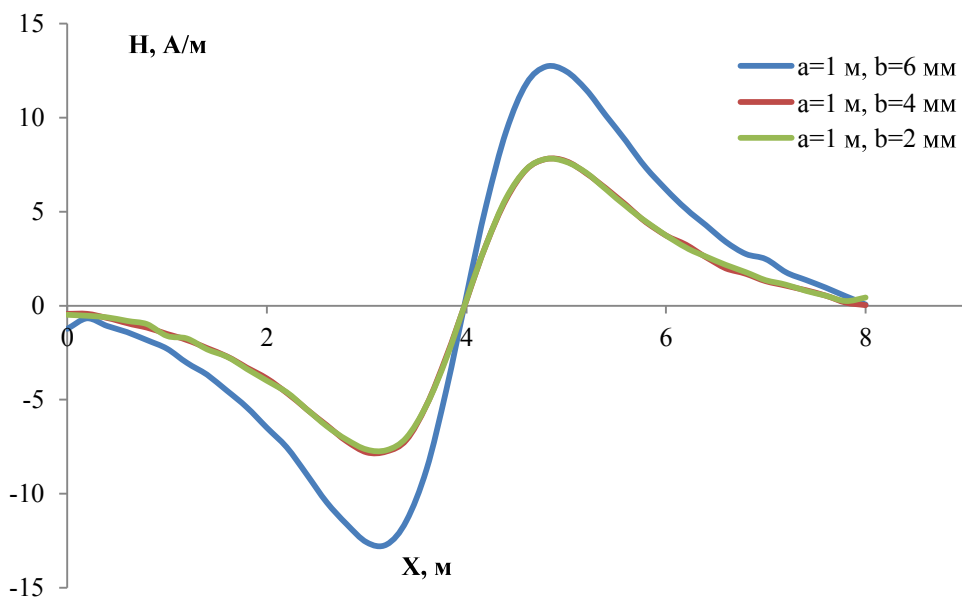


Рис.6. Значения вертикальной составляющей напряженности магнитного поля, считанные на расстоянии 1 м над коррозионным пятном, имеющим различную глубину b и постоянную ширину a .

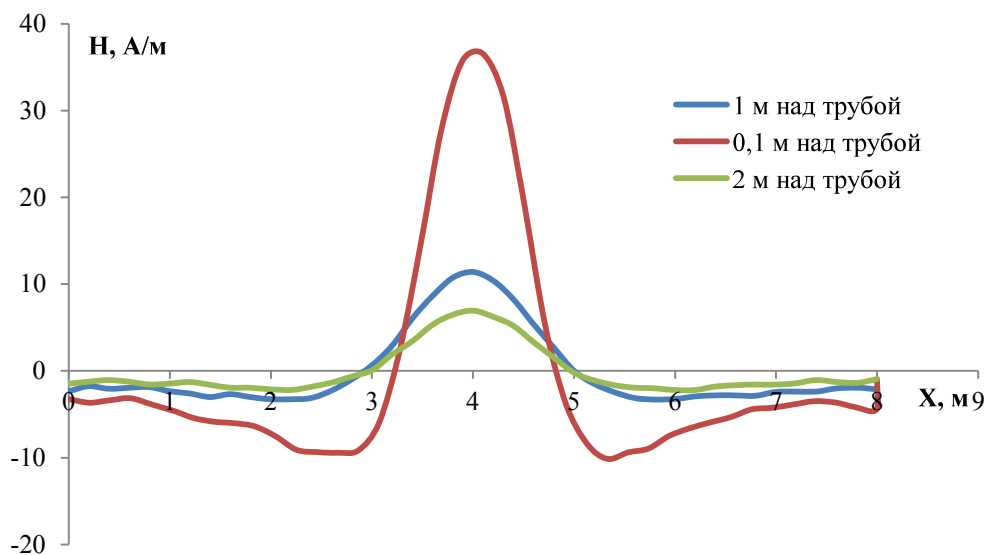


Рис.7. Значения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля, считанные на разном расстоянии над коррозионным пятном, имеющим постоянную глубину b и ширину a .

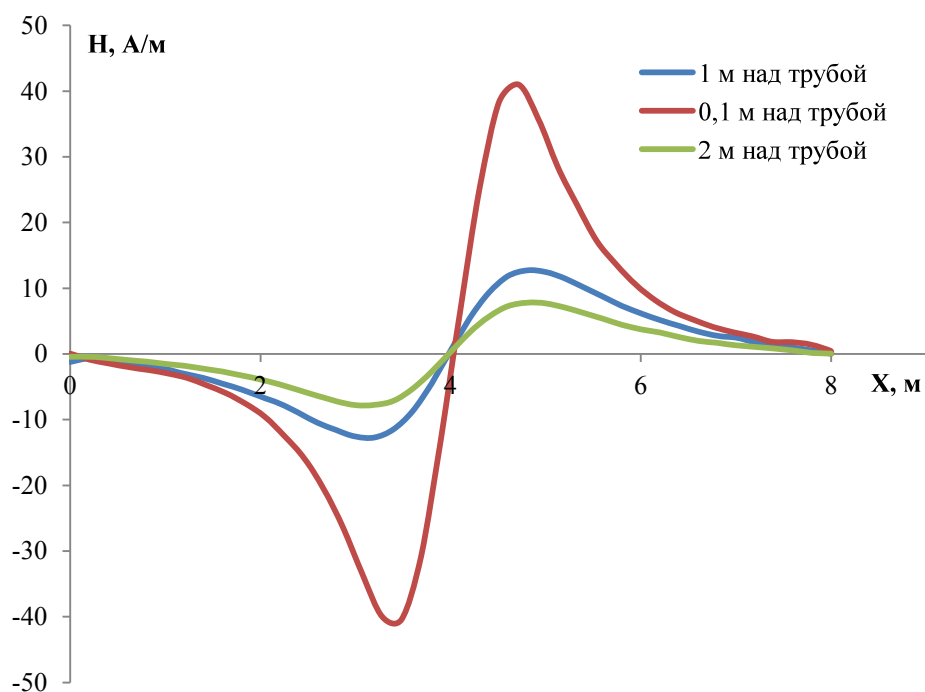


Рис.8. Значения вертикальной составляющей напряженности магнитного поля, считанные на разном расстоянии над коррозионным пятном, имеющим постоянную глубину b и ширину a .

Описание метода

В данной работе рассматривается метод обработки сигнала с использованием вейвлет-преобразований на примере магнитограммы, снятой с подземного трубопровода. Вейвлет-преобразование – один из наиболее функциональных математических аппаратов для анализа и цифровой обработки сигналов. Основная область применения вейвлет-преобразований – это анализ и обработка сигналов и функций с изменяющимся во времени частотным спектром или неоднородных в пространстве [8].

Преобразование сигнала выполняется с целью разделения его на компоненты. Каждая компонента является мерой присутствия в сигнале соответствующей базисной функции. Определение состава компонент в заданном базисе выполняется с помощью прямого преобразования (анализ сигнала). Обратное преобразование позволяет получить сигнал по известному составу его компонент и базису, в котором эти компоненты определены [8].

Вейвлет-преобразование предоставляет большую информативность. К примеру, Фурье-преобразование в результате дает частотный спектр сигнала, при этом оставляя открытым вопрос о том, присутствуют ли эти частоты во всем сигнале, либо же в какой-то локальной области сигнала. Вейвлет-преобразование способно показать, где и в какие промежутки времени в сигнале присутствуют те или иные частоты [8].

Так как при снятии магнитограммы используется трехкомпонентные датчики, для измерения магнитного поля по трем осям декартовой системы координат (т.е. направления измерений вдоль трубы по горизонтали и перпендикулярно трубе по горизонтали и по вертикали), то магнитограмма представляет собой набор трех сигналов – тангенциальной и двух нормальных составляющих соответственно. Для выявления дефекта требуются графики сигналов измерений вертикальной и горизонтальной (вдоль трубы) составляющих, показанных на рисунке 9.

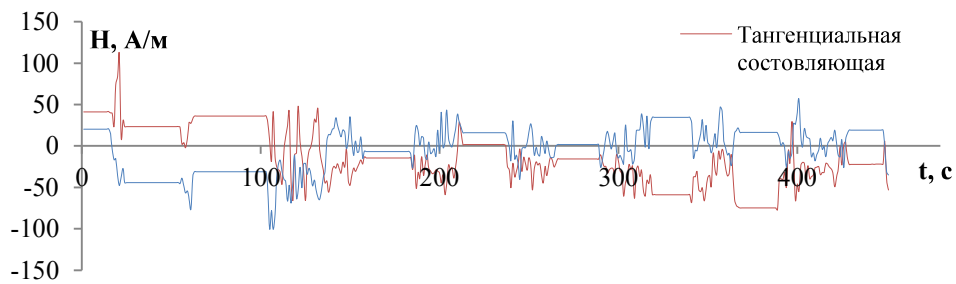


Рис.9. Часть записи магнитограммы

Проведя вейвлет-преобразование для обоих сигналов с использованием соответствующих вейвлетов, можно получить карты горизонтального рельефа, показанные на рисунках 10, 11. На представленных картах красным цветом обозначены участки сигнала, наиболее соответствующие отклику от моделируемого дефекта.

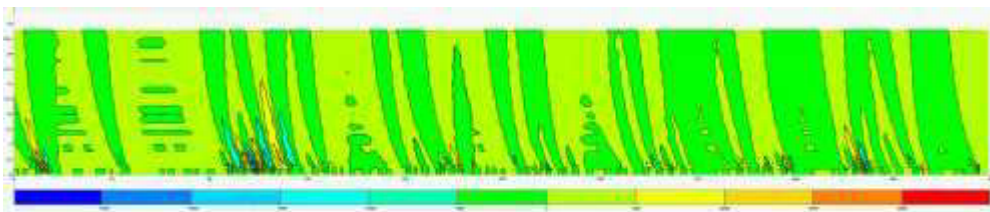


Рис.10. Карта горизонтального рельефа сигнала тангенциальной составляющей.

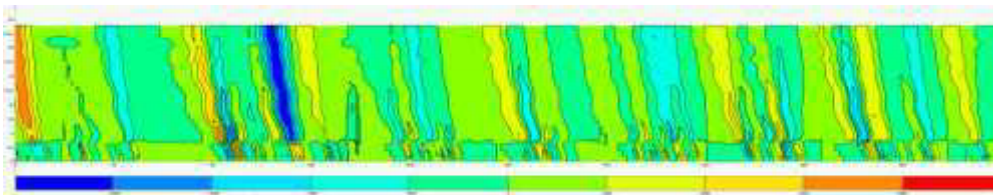


Рис.11. Карта горизонтального рельефа сигнала нормальной составляющей.

Наложение карт друг на друга позволяет определить пересечение областей, в которых сигналы максимально похожи на отклики моделируемого дефекта. Следовательно, можно предположить, что область пересечения указывает на участок сигнала, в котором вероятность нахождения дефекта наиболее высока.

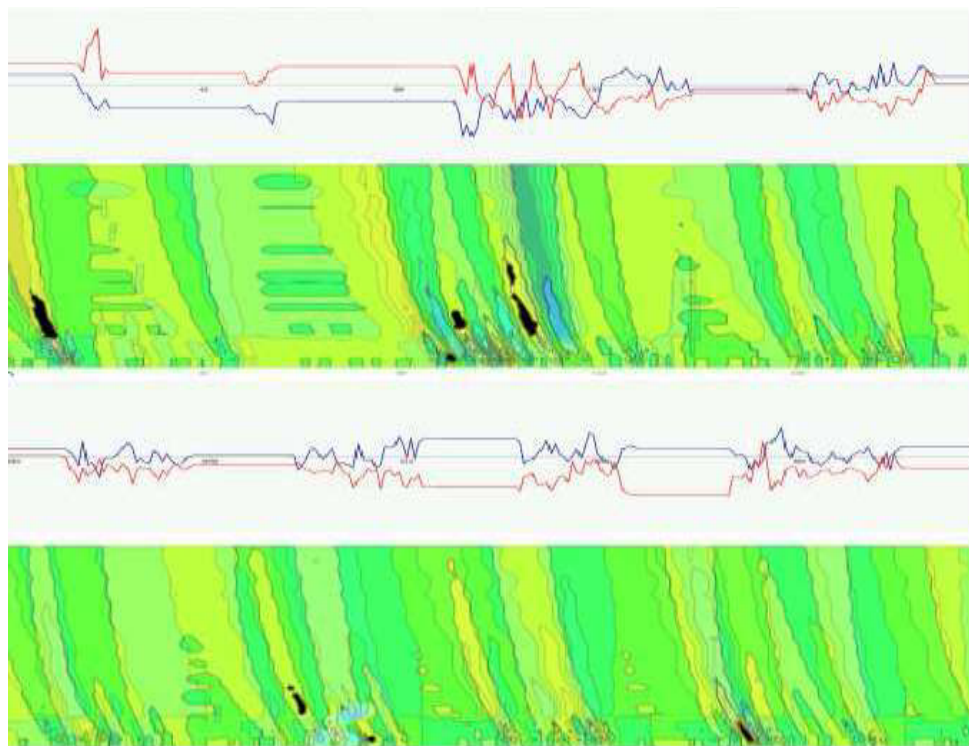


Рис.12. Наложенные друг на друга карты горизонтального рельефа. Черным цветом выделены участки пересечения.

Заключение

В настоящей работе рассмотрен метод выявления дефектов трубопроводов, основанный на вейвлет-преобразовании сигнала дистанционной магнитометрии. Показано, что существенное влияние на результаты преобразования сигнала оказывают форма и масштаб откликов дефекта, т.е. форма и масштаб применяемых вейвлетов. При этом расстояние между трубопроводом и датчиком, а также геометрические параметры дефекта не оказывают влияния на форму кривой отклика дефекта. Предложенный метод можно применять для обследования и диагностики любых трубопроводов, в том числе и морских.

Список литературы:

1. Саксон, В.М. Диагностика стальных трубопроводов методом бесконтактной магнитометрии [Текст] / В.М. Саксон // Мир измерений. – 2012. – №6. – С. 17-21.
2. Алешин, И.В. Современные методы и технические средства обнаружения в толще морской среды аварийных утечек нефти из подводных трубопроводов [Текст] / И.В. Алешин, В.К. Гончаров, В.Ю. Осадчий, И.М. Левин, Т.М. Радомысльская, Н.Ю. Клементьева, В.С. Колобков, В.В. Зеленски, Джун Ли // Морской вестник. – 2006. – № 2 (18). – С. 78-84.
3. Лаптева Т.И.: Разработка методов обеспечения работоспособности морских нефтегазопроводов в сложных инженерно-геологических условиях арктического шельфа [Текст]: дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. Наук: 25.00.19: защищена 30.10.19. – Москва, 2019. – 289 С.
4. Dapeng W. Estimating offshore exposure to oil spill impacts based on a statistical forecast model // Dapeng W., Weijun G., Shujun K., Tiaojian Xu // Marine Pollution Bulletin. – 2020. – №156. – С. 1-9.
5. Стариков, В.С. Инженерная магнитометрия при исследовании технического состояния стальных трубопроводов большого диаметра [Текст] / В.С. Стариков // Вестник воронежского государственного университета. серия: Геология. – 2016. – №3. – С. 114-118.

6. Иваненко, А.Н. Определение пространственного положения подводных трубопроводов с использованием полноградиентной магнитометрической системы [Текст] / А.Н. Иваненко, В.В. Архипов, В.А. Сапунов // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2018. – № 4 (36). – С. 94-104.
7. Смирнов Н.А. Применение математического моделирования при диагностике состояния трубопровода магнитными методами неразрушающего контроля [Текст] / Н.А. Смирнов, С.М. Ельцова, Р.З. Мухаматуллин // Материалы международной научно-практической конференции молодых исследователей им. Д.И. Менделеева. – 2020. – С. 26-28.
8. Сайфулин, Р.Т. Непрерывное вейвлет-преобразование сигналов аналитических приборов [Текст] / Р.Т. Сайфулин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2011. – № 2 (30). – С. 76-82.
9. Алексеев, В. И. Вейвлет-анализ сигналов дефектоскопов, локализация и измерение глубин разрушений внутритрубных дефектов трубопроводов [Текст] / В. И. Алексеев, Р. А. Булатов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – № 2. – С. 70-77
10. Дмитриевский, А.Н. Бесконтактная диагностика нефтегазопроводов: состояние и перспективы развития [Текст] / А.Н. Дмитриевский, С.С. Камаева, А.Д. Черников, Н.А. Еремин // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – № 1 (20). – С. 11.
11. Игнатьев, А.А. Магнитометрия слабых магнитных полей [Текст] / А. А. Игнатьев // Гетерогенная микрорелектроника. – 2013. - №15. – С. 11-32.

METHOD FOR DETECTING DEFECTS IN MARINE PIPELINES BY WAVELET ANALYSIS OF REMOTE MAGNETOMETRY SIGNAL

Vitaly A. Veselov

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Vladimir V. Probotyuk

Tyumen industrial University, Tyumen, Russia

Maksim V. Kitaev

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Oleg E. Surov

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Abstract. The paper considers a method for detecting offshore pipelines defects using a wavelet transform of a remote magnetometry signal. This method makes it easier and faster to process large amounts of information obtained as the measurement result. According to statistics, 40% to 50% of accidents with offshore pipelines occur due to the pipe walls corrosion. Thus, the research aimed to develop the methods for offshore pipelines inspection and diagnostics is very important. For the testing of the suggested method for detecting pipeline defects, on the engineering analysis software ELCUT base a numerical model describing the magnetic field distribution in the area of corrosion spot located on the pipe wall was developed. It is shown that the suggested method can be used for detecting the defects and evaluating the offshore pipelines technical condition.

Keywords: marine pipelines, corrosion, defects, remote magnetometry, analysis method, wavelet transform, non-destructive testing

References:

1. Sakson, V.M. "Diagnostika stal'nyh truboprovodov metodom beskontaktnoj magnitometrii" (Diagnostics of steel pipelines by contactless magnetometry) *Mir izmerenij* 6 (2012): 17-21.
2. Aleshin. I.V., Goncharov. V.K., Osadchij. V.Yu., Levin. I.M., Radomylskaya. T.M., Klement'eva. N.Yu., Kolobov. V.S., Zelenskij. V.V., Djun Li "Sovremennye metody i tekhnicheskie sredstva obnaruzheniya v tolshe morskoy sredy avarijnyh utechek nefi iz podvodnyh truboprovodov" (Modern methods and technical means for detecting accidental oil leaks from underwater pipelines in the marine environment) *Morskoy vestnik* 2 (2006): 78-84.

3. Lapteva T.I. Razrabotka metodov obespecheniya rabotosposobnosti morskikh neftegazoprovodov v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh arkticheskogo shel'fa: dis. na soisk. uchen. step. d-ra tekhn. Nauk: 25.00.19: zashchishchena 30.10.19., Moskva, 2019. 289 p.
4. Dapeng W., Weijun G., Shujun K., Tiaojian Xu "Estimating offshore exposure to oil spill impacts based on a statistical forecast model" Marine Pollution Bulletin 156 (2020): 1-9.
5. Starikov, V.S. "Inzhinernaya magnitometriya pri issledovanii tekhnicheskogo sostoyaniya stal'nykh truboprovodov bol'shogo diametra" (Engineering magnetometry in the study of the technical condition of large-diameter steel pipelines) Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. seriya: Geologiya 3 (2016): 114-118.
6. Ivanenko. A.N., Arhipov. V.V., Sapunov. V.A. "Opreделение prostranstvennogo polozheniya podvodnykh truboprovodov s ispol'zovaniem polnogradientnoy magnitometricheskoy sistemy" (Determination of the spatial position of underwater pipelines using a full-gradient magnetometric system) Nauchno-tekhnicheskij sbornik Vesti gazovoy nauki 4 (2018): 94-104.
7. Smirnov N.A., El'cova S.M., Muhamatullin R.Z. "Primenenie matematicheskogo modelirovaniya pri diagnostike sostoyaniya truboprovoda magnitnymi metodami nerazrushayushchego kontrolya" (Application of mathematical modeling in diagnostics of pipeline condition by magnetic methods of non-destructive testing) Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii molodykh issledovatelej im. D.I. Mendeleeva 2020: 26-28 p.
8. Sajfulin, R.T. Nepreryvnoe vejvlet-preobrazovanie signalov analiticheskikh priborov (Continuous wavelet transform of analytic instruments signals) Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki 2 (2011): 76-82 p.
9. Alekseev. V.I., Bulatov. R.A. "Vejvlet-analiz signalov defektoskopov, lokalizaciya i izmerenie glubin razrushenij vnutritrubnykh defektov truboprovodov" (Wavelet analysis of flaw detector signals, localization and measurement of the depth of destruction of in-line pipeline defects) Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproductov 2 (2013): 70-77.
10. Dmitrievskij, A.N., Kamaeva S.S., Chernikov A.D., Eremin N.A. "Beskontaktnaya diagnostika neftegazoprovodov: sostoyanie i perspektivy razvitiya" (Contactless diagnostics of oil and gas pipelines: status and prospects of development) Aktual'nye problemy nefti i gaza 1 (2018): 11 p.
11. Ignat'ev. A.A. Magnitometriya slabyyh magnitnykh polej (Magnetometry of weak magnetic fields) Geteromagnitnaya mikroelektronika 15 (2013): 11-32.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Веселов Виталий Алексеевич, студент магистратуры департамента морской техники и транспорта, «Дальневосточный федеральный университет», (ФГАОУ ВО ДВФУ), 690922, г. Владивосток, остров Русский, п. Аякс, 10, e-mail: veselov.va@students.dvfu.ru

Проботюк Владимир Викторович, к.т.н., доцент кафедры физики, методов контроля и диагностики, «Тюменский индустриальный университет» (ВГБОУ ВО «ТИУ»), 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, e-mail: probotjukvv@tyuiu.ru

Китаев Максим Владимирович, к.т.н., доцент департамента морской техники и транспорта, «Дальневосточный федеральный университет», (ФГАОУ ВО ДВФУ), 690922, г. Владивосток, остров Русский, п. Аякс, 10, e-mail: kitaev.mv@dvfu.ru

Суров Олег Эдуардович, к.т.н., доцент департамента морской техники и транспорта, «Дальневосточный федеральный университет», (ФГАОУ ВО ДВФУ), 690922, г. Владивосток, остров Русский, п. Аякс, 10, e-mail: surov.oye@dvfu.ru

Vitaly A. Veselov, master's degree student of the Department of marine engineering and transport, Far Eastern Federal University, 10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922

Vladimir V. Probotyuk, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of physics, monitoring and diagnostic methods, Tyumen industrial University, 38, Volodarskogo st, Tyumen, 625000

Maksim V. Kitaev, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of marine engineering and transport, Far Eastern Federal University, 10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922

Oleg E. Surov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of marine engineering and transport, Far Eastern Federal University, 10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922

Статья поступила в редакцию 22.10.2020 г.