

ПАРАДИГМА ЦИФРОВОГО ОБРАЗА ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА КАК ОСНОВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА В ЗАДАЧЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (НА ПРИМЕРЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА)

А. А. Яковлева¹, В. В. Семенов², Д. К. Мединская¹, И. Б. Мовчан¹, З. И. Садыкова³

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

² ООО «Диагностические системы», г. Санкт-Петербург, Россия

³ Группа компаний «Геоскан», г. Санкт-Петербург, Россия

* **Контакт:** Зилия Ириковна Садыкова, z.sadykova@geoscan.ru

Актуальность работы определяется автоматизацией процессов мониторинга природно-технических систем не столько в части измерительной их составляющей, сколько в плане истолкования результатов мониторинга в терминах свойств искомого объекта. Таковым в настоящей работе выступают погруженные трубопроводные системы – магистральные нефте- и газопроводы, как частный случай геотехнических объектов. Целью разработки автоматизированного рабочего места (АРМ) под конкретный объект выступает предельная параметризация интерпретационной процедуры и унификация конечных графических построений в рамках единого цифрового образа магистральных трубопроводов. С учетом детерминированного типа геотехнического объекта и целей изысканий, методы исследований включают, помимо неразрушающего магнитометрического контроля как способа получения первичных данных: приёмы качественной и количественной интерпретации материалов многоканальной магнитометрии; способы систематики и графического отображения первичных данных и итогов их истолкования. В рамках общепринятых в нефтегазовой отрасли подходов цифровой образ нарушенных участков трубопровода опирается на представления об утонении стенок труб и о связанных с зонами утонения напряженных состояниях. Напряженные состояния ферромагнитных стенок погруженных трубопроводов формируют специфические отклики во внешнем магнитном поле, тогда как собственно утонения стенок трубопровода обнаруживаются контактными методами. Результаты выполненных изысканий сводятся к системной параметризации данных магнитометрического неразрушающего контроля в рамках разрабатываемой структуры АРМ. Содержание выводов сводится к разработке принципа безэталонного распознавания рискованных участков трубопровода как полностью автоматизированной составляющей рабочего места.

Ключевые слова: автоматизированное рабочее место, комплекс бесконтактной диагностики, параметризация, метод магнитной памяти металлов, неразрушающий контроль, погруженный трубопровод, качественная и количественная интерпретация.

Цитирование: Яковлева, А. А., В. В. Семенов, Д. К. Мединская, И. Б. Мовчан, З. И. Садыкова Парадигма цифрового образа геотехнического объекта как основа автоматизированного рабочего места в задаче неразрушающего контроля (на примере магистрального трубопровода) // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES3006. — DOI: 10.2205/2025es001010 — EDN: LMLSGM

<https://elibrary.ru/LMLSGM>

Получено: 2 декабря 2024 г.

Принято: 1 апреля 2025 г.

Опубликовано: 28 апреля 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

Введение

Разработка автоматизированного рабочего места (АРМ) есть частный аспект автоматизации производственных процессов и систем управления, нацеленных на оптимизацию функционала так называемых линейных рабочих, вплоть до полного их исключения из этого производства [Bazhin et al., 2023; Litvinenko, 2019; Nguyen and

Bazhin, 2023]. Хотя непосредственным инициатором отмеченных автоматизированных решений и оптимизаций выступает производственный заказчик, им же осознаётся неприемлемость полного исключения экспертов из производственного цикла в силу юридического аспекта ответственности за ключевые решения. Одним из основных компонентов АРМ, помимо набора цифровых характеристических параметров обследуемого объекта, должны выступать средства экспертной верификации заключения автоматизированной системы. Как итог, требовалось создание АРМ для диагноста (АРМД), ориентированного на синтез эмпирических оценок данных неразрушающего магнитометрического контроля состояния погруженного трубопровода и автоматизированной экспертизы этих данных [Альбанова и др., 2005; Любчик, 2012]. «Неразрушающий магнитометрический контроль» представляет собой модификацию пассивной магнитометрии, реализующей комбинацию измерений компонент вектора магнитной индукции $\vec{B}$ и градиентометрии с интеграцией в структуру АРМД [Щипачев и Алжадли, 2023; Wang et al., 2022]. Рабочее ядро современных АРМов и планируемого на их основе АРМД должны составлять современное программное обеспечение, включающее [Kalinin et al., 2023; Kiani and Chikweri, 2021; Obiora et al., 2021]:

- анализ амплитудно-частотного и морфологического состава сигнала при его последующем пересчете в трансформанты с контрастированными малоамплитудными аномалиями;
- показательную графику с двух- и трёхмерными отображениями, как элемент геоинформационной системы;
- средства обобщения комплекса данных об исследуемом объекте в единой базе, сортируемой на комплекс разделов, в том числе, «исходные сигналы», «описания объекта», «трансформанты», «описания дефектов».

В части систем мониторинга состояния геотехнических объектов известно такое программное обеспечение как ZETLAB monitoring (анализ состояния инженерных сооружений) и OIS Pipe (определение состояния трубопроводов). Такой мониторинг осуществляется, в том числе, в режиме реального времени внешним аппаратным компонентом, устанавливаемым на обследуемой инженерной конструкции [ГОСТ Р ИСО 6385-2007, 2007]. Таковым компонентом в нашем случае выступает КБД (комплекс бесконтактной диагностики на базе феррозондового (без следящей системы) 18-канального магнитометра-градиентометра), оценивающий три составляющие $\vec{B}$ и три пространственных градиента этих составляющих по трём взаимно перпендикулярным антеннам. Эффективность магнитометрии в данном направлении объясняется:

- изготовлением отдельных секций магистральных нефте- и газопроводов из малоуглеродистых ферромагнитных сплавов;
- магнитной памятью металла, являющейся частным случаем эффекта магнитоупругости.

Согласно данному эффекту, упругопластические деформации ферромагнетика определяют изменение доменной его структуры с тенденцией к укрупнению домен. Такая перестройка доменной структуры на локальных участках трубопровода, традиционно аппроксимируемых моделью диполя, обнаруживается в аномальных мало контрастных откликах во внешнем магнитном поле. Мало контрастность и аperiодичность отмеченных откликов определяет первичность визуальных (экспертных) оценок, сформировавших начальную методику исследований [Мовчан и др., 2022].

Начальная методика исследований

Идеологом бесконтактного контроля методом магнитометрии выступает А. А. Дубов – старший, опубликовавший концептуальные позиции по методу магнитной памяти металла и его прикладным аспектам в 1990-х годах [Власов и Дубов, 2004; Дубов, 1998; Дубов и др., 2012]. Согласно им, многократно приложенная к ферромагнитным изделиям внешняя нагрузка увеличивает интенсивность аномального эффекта от данного изделия во внешнем магнитном поле. Такое соответствие зафиксировано эмпирически,

а его аналитическое описание можно отнести к более или менее удачным аппроксимациям. Потому ниже физико-математические основы рассмотрены в общих чертах при детализации элементов, касающихся непосредственно решаемой нами задачи.

Как и в случае с кривой гистерезиса, процесс чередования роста и падения внешней нагрузки на ферромагнетик определяет циклический характер перемагничивания при значимом остаточном эффекте. Многократное колебание внешней нагрузки обуславливает переход от упругих к упругопластическим деформациям, что на фоне перестройки доменной структуры ферромагнетика инициирует повышение подвижности дислокаций его кристаллической решетки. Области повышенной концентрации дислокаций выступают концентраторами напряжений, порождающими трещинообразование ферромагнитного образца [Новожилов, 2012; Kronmüller and Seeger, 1969]. Заготовка сегмента трубопровода, сходя с прокатного стана и преодолевая точку Кюри, намагничивается во внешнем магнитном поле Земли до состояния, проявляемого как диполь. Последующие преобразования означенного сегмента с накоплением напряжений и порождаемой ими генерацией локальных дефектов дают дипольные отклики меньшей протяженности во внешнем макрополе. Окончательно, магнитная структура трубы может быть охарактеризована как структура взаимно-вложенных диполей (в дальнейшем – диполь-дипольная структура). Такой детерминизм упрощает процедуру анализа магнитометрического сигнала, получаемого на основе трёх взаимно перпендикулярных измерительных антенн.

Феррозондовые сенсоры КБД обеспечивают регистрацию отмеченных выше составляющих $\vec{B}$ и их градиентов на уровне мкТл, что относит магнитные аномалии к классу техногенных - отклики от геологической среды и магнитные вариации (уровень нТл) принимаются пренебрежимо малыми. Измерения выполняются в локальной системе координат (рис. 1), где ось Oy ориентирована вдоль оси трубопровода по ходу оператора, ось Ox – вертикально вниз, а горизонтальная ось Oz – горизонтально вправо относительно хода.

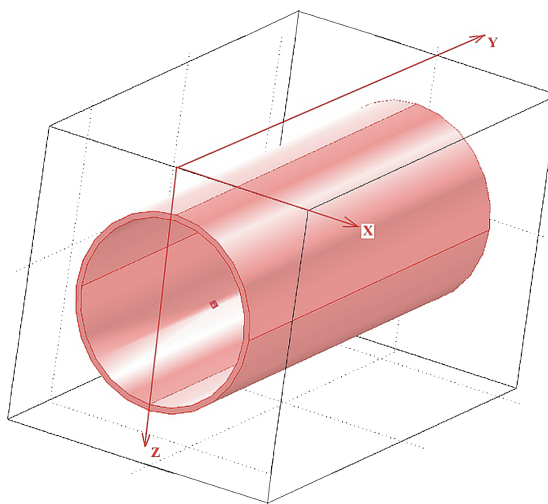


Рис. 1. Локальная система координат, к осям которой привязана ориентация антенн измерительного блока комплекса бесконтактной диагностики.

Таким образом, для y -вой антенны длиной L_y получаем в режиме реального времени измерений количественные определения трёх компонент, усредненных по двум группам взаимно ортогональных феррозондов, B_x , B_y и B_z , а также трёх нормированных приращений этих компонент по линии Y -вой антенны – $\Delta B_x/L_y = \Delta B_x/\Delta y \approx dB_x/dy$, $\Delta B_y/L_y \approx dB_y/dy$, $\Delta B_z/L_y \approx dB_z/dy$. Для оценки погрешности измерений по каждому 100-метровому интервалу реализуют повторный проход. Как отмечалось, искомой морфологической особенностью выступает локальный дипольный отклик от аномально напряжённого участка трубопровода (рис. 2а).

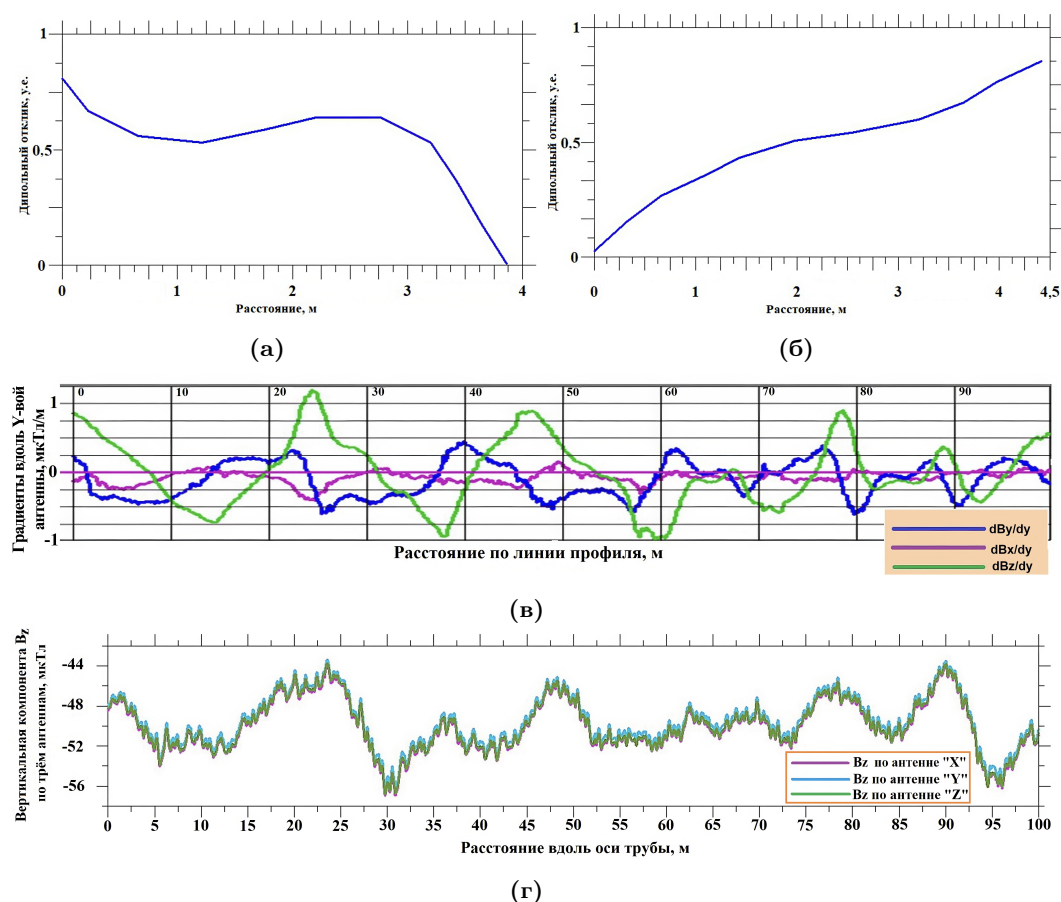


Рис. 2. Магнитометрические отклики в рамках гипотезы диполь-дипольной структуры трубопровода: (а) и (б) – варианты дипольного отклика от напряженного участка трубопровода; (в) – графики градиентов компонент вектора магнитной индукции измеренной вдоль Y-вой антенны; (г) – зашумленные графики компоненты B_z по трём антеннам.

В структуре графика компоненты вектора магнитной индукции или её пространственного градиента этот локальный дипольный отклик заметен на фланге экстремума значительно большей протяженности, маркирующего, например, поперечные стыковые швы. Эмпирически установлено, что расстояние между точками перегиба, ограничивающими длину по линии профиля «локального дипольного отклика», варьируется в диапазоне от 2,5 до 5 метров. В зависимости от ряда факторов дипольная морфология искомого аномального отклика способна как дифференцированно отображаться на графиках, так и сглаживаться до террасообразной формы («полочки») на фланге указанного выше экстремума (рис. 2б). К таким факторам можно отнести рост расстояния от аномального участка до наблюдателя, наложение поля напряженного участка на поля соседних намагниченных неоднородностей. На основе гипотез (а) и (б) на рис. 2 в структуре графиков рис. 2в отчетливо видны аномальные зоны на интервалах 25–30 м, 41–45 м, 73–75 м. В структуре графиков рис. 2г эти отклики неразличимы. Множество рискованных участков, таким образом, требует разбраковки. Наибольший вес в плане экспертного выявления аномального отклика принадлежит графикам пространственных градиентов компонент вектора магнитной индукции. Дополнительно к ним, отфильтрованные графики компонент и графики градиентов этих компонент пересчитываются в несколько десятков графиков трансформант для детального ранжирования выявленных нарушенных участков трубопровода.

В качестве примера физически истолковываемой трансформанты приведём пересчет в интенсивность нормальных напряжений (рис. 3а):

$$J_n = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_z}{\partial z} \right)^2}.$$

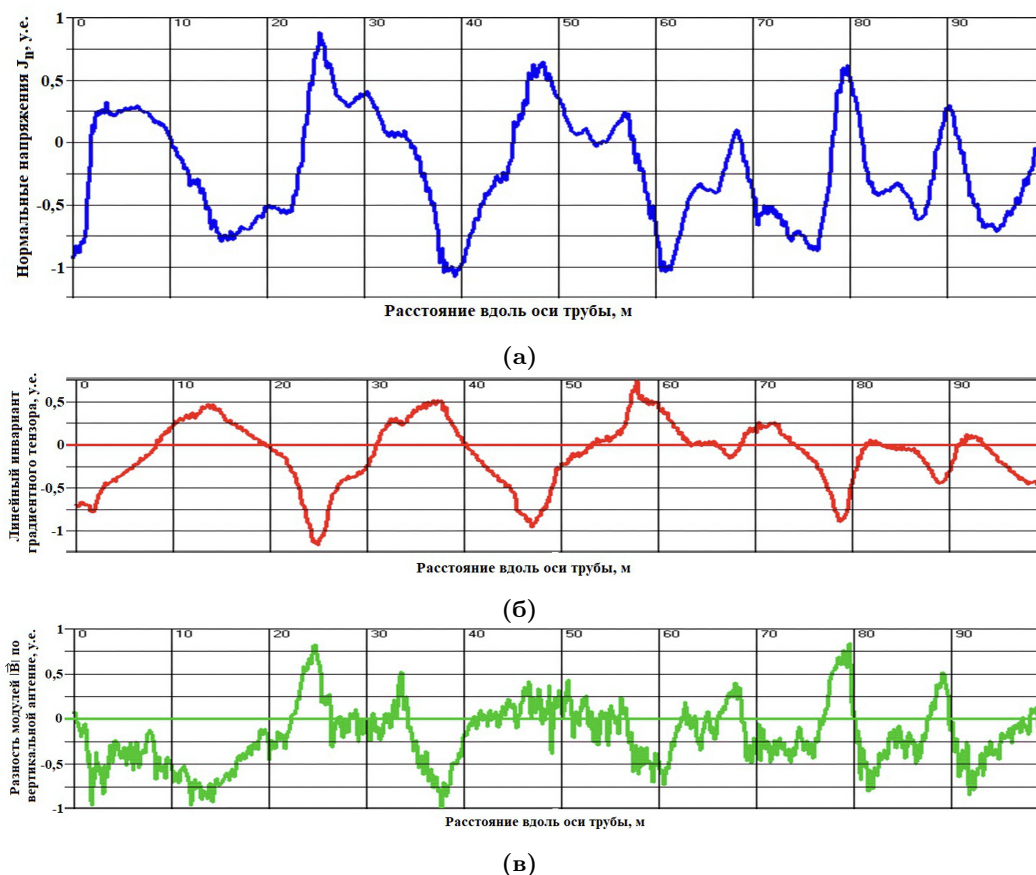


Рис. 3. Примеры трансформант ((а)–(в): см. пояснения в тексте) многоканальной магнитометрии с обобщением коррелируемых дипольных проявлений по двум проходам профиля в виде накопления весов для конкретных пространственных интервалов измерительного профиля (табл. 1).

В качестве примера трансформанты с геометрической трактовкой отметим линейный инвариант градиентного тензора (рис. 3б):

$$I_1 = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z}.$$

Примером формальной трансформанты, больше имеющей отношение к операции фильтрации, нежели к физически истолковываемому процессу, можно назвать разность модулей $\vec{B}$ между двумя тройками феррозондовых датчиков по Y-вой антенне (рис. 3в). В итоговых графиках трансформант эксперт визуально выискивает либо аномальный дипольный отклик протяженностью 2,5–5,0 м, либо выраженный пик, коррелируемый с дипольным откликом в графиках первичных градиентов. Итог поиска имеет форму бланка, заполняемого по двум прямым проходам оператора отдельного 100-метрового интервала измерительного профиля (табл. 1). Бланк содержит метраж аномальных участков и их накопленный вес: такой подход отлично зарекомендовал себя в рамках 20-летней производственной апробации, но не отвечает автоматизированной сущности рабочего места диагноста.

Таблица 1. Пример экспертного обобщения при накоплении весов рискованных оценок (колонка «Количество») для конкретных пространственных интервалов измерительного профиля (колонки «Начало» и «Конец» – в метрах) в рамках его первого прохода (1 пр.) и второго прохода (2 пр.) оператором

1 пр.			2 пр.		
Начало	Конец	Количество	Начало	Конец	Количество
2	2,5	3	3	3,5	3
7,5	8	4	3,5	4	10
9,5	10	5	8,5	9	7
20,5	21	6	9	9,5	4
27	27,5	7	9,5	10	3
30,5	31	4	17,5	18	3
31,5	32	3	23,5	24	5
46,5	47	3	29	29,5	4
47	47,5	3	30,5	31	3

Результаты дополнения цифрового образа – параметрическая автоматизированная интерпретация

В условиях гипотетически идеальной технологической схемы формирования трубопровода и его эксплуатации источник нарушений объекта предполагает два ключевых фактора: взаимодействие трубопровода с окружающим ландшафтом; влияние неоднородности материала труб и их сварных соединений. В рамках первого фактора можно говорить о следующих эффектах:

1. подчиненность трубопровода рельефу земной поверхности, что определяет нагружение локальных участков трубопровода в областях изгиба;
2. накапливающаяся со временем деформация оси трубопровода в областях с изменяющейся несущей способностью подстилающих грунтов;
3. рост усталостных нагрузок за счет перманентного воздействия широкополосных вибрационных полей на тело трубопровода.

Второй фактор требует рассмотрения таких особенностей как:

4. наличие потенциальных источников разрушения материала стенок трубы (краевых и винтовых дислокаций и проч.);
5. деформация труб в окрестности воздействия сварочных работ;
6. дефекты как собственно сварного соединения (внешние и внутренние), так и вторичные его нарушения – в форме горячих трещин, развивающихся как в пределах зоны термического влияния, так и вне ее.

В системе перечисленных проявлений наблюдается сложное их взаимодействие, определяющее доминирующую роль упругопластических деформаций стенок трубопровода в его аварийности. Детальный анализ первоисточников показывает, что магнитоупругие эффекты зафиксированы на уровне эмпирических обобщений: цикличность изменения остаточной намагниченности при периодическом приложении внешней нагрузки, связь внешней нагрузки с величиной коэрцитивной силы и с магнитной анизотропией материала, высокие частоты осцилляции собственного магнитного поля образца в зависимости от упруго-пластических и разрывных деформаций и проч. В зонах усталостных деформаций образцов ферромагнитных сплавов наблюдается относительно высокая намагниченность, даже в отсутствие искусственного подмагничивания. Данное явление сводится к взаимно обусловленным намагничиванию ферромагнетика и изменению его формы (размеров). Явление проявлено в ферромагнетиках, где относительное удлинение достигает величины 10^{-2} , тогда как в прочих материалах, определяемых диамагнетиками, антиферромагнетиками, парамагнетиками, относительное удлинение под действием того же намагничивания меньше на два-четыре порядка. Природу магни-

тоупругих деформаций объясняют изменением диполь-дипольных и спин-орбитальных сил, обобщаемых до термина «магнитные силы», либо изменением сил обменных.

Несмотря на малую интенсивность квазипериодических аномальных магнитных откликов непосредственно от пространственно небольшой зоны нарушений в стенке трубопровода, эти осцилляции фиксируются на значительном удалении от данной зоны – до первых метров. Такое удаление можно объяснить сопряжением дефектообразования, с одной стороны, и, с другой стороны, макроскопических интервалов упруго-пластических деформаций трубопровода, а также вторичных процессов – коррозией на его стенках, полями рассеяния на группах дефектов, резонансными эффектами. Нестационарность этих процессов позволяет допустить наличие повышенной изменчивости компонент $\vec{B}$ и их пространственных градиентов в малой окрестности нарушенного участка трубопровода. Тогда, для оценки участков повышенной изменчивости магнитного поля можно использовать апробированный параметр вариации Боровко [Боровко, 1979; Долгалъ и Христенко, 2008]:

$$\Psi(x) = (L)^{-1} \int_0^L \sqrt{|\Delta_2 U(x)|} \cdot \delta(x - \tau) d\tau, \quad (1)$$

где $\delta(x)$ – единичная передаточная функция, заданная на конечном интервале $\lambda \ll L$ (здесь L – общая длина профиля, на котором определен экспериментальный сигнал, λ – гипотетическая длина волны, равная или кратная ширине аномального отклика, порождаемого нарушенным участком трубопровода, x – фиксированная координата на профиле, τ – смещение относительно координаты x при свёртке), Δ_2 – оператор конечной разности второго порядка: $\Delta_2 U(x) = U(x) - 2U(x + \Delta x) + U(x + 2\Delta x)$, $U(x)$ – компонента вектора магнитной индукции или её пространственный градиент по одной из координатных осей, оцифрованные с пространственным шагом Δx . Интервал проявления λ аномального отклика недетерминирован, т.е. рационально реализовывать численную оценку параметра Боровко для нескольких $\lambda \in [\lambda_1, \lambda_2]$ с применением к каждому распределению $\Psi_\lambda(x)$ оператора стандартизации: $\tilde{\Psi}_\lambda(x) = \mathfrak{Z}[\Psi_\lambda(x)]$ для сведения параметра изменчивости $\Psi(x)$ к единому динамическому диапазону для разных длин волн. Итог, представляемый в виде

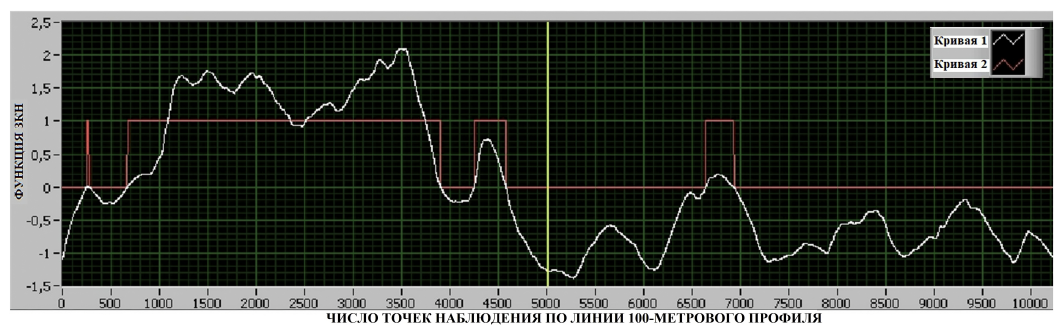
$$\Omega(x) = \lambda^{-1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tilde{\Psi}_\lambda(x) d\lambda, \quad (2)$$

– нормированной суммы стандартизированных распределений $\tilde{\Psi}_\lambda(x)$ определяется нами, как функция ЗКН (зон концентраций напряжений), образец расчета которой отражён на рис. 3а (кривая 1).

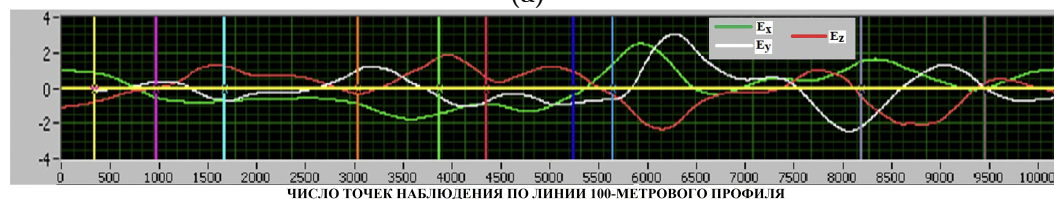
Можно видеть, что по сравнению с данными прямых измерений (рис. 2в, 2г) график эмпирической функции ЗКН (рис. 4а) имеет более закономерную структуру в части незашумленности экстремумов и градиентных зон. Эта структура естественна: интегрирование в скользящем окне (1) даёт эффект сглаживания для фиксированной длины волны; стандартизация и последующее суммирование (2) разнодлиноволновых оценок (1) определяет усиление синфазных компонент. Практический опыт требует расчета функции $\Omega(x)$ независимо по компонентам вектора магнитной индукции и по их пространственным градиентам в силу разного диапазона пространственных частот, где сосредоточены информативные спектральные гармоники:

- хотя графики компонент $\vec{B}$ сильно зашумлены, именно они выступают результатом прямых измерений внешнего магнитного поля;
- графики пространственных градиентов есть итог пересчета графиков компонент вектора магнитной индукции в реальном времени измерений, хотя анализ пространственных градиентов повышает чувствительность измерительного комплекса.

Несмотря на упрощенную структуру функции ЗКН (рис. 4а), нами сделана попытка её дополнительной нормировки по критерию $\bar{\Omega} \pm (1,5 \div 2)\sigma$ (отбраковки функции ЗКН на основе доверительного интервала) для получения распределения единичных



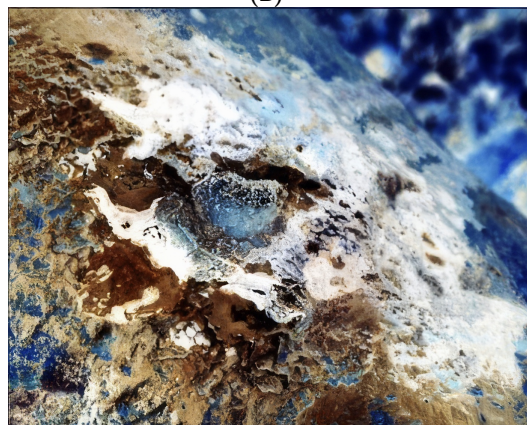
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 4. Элементы автоматизированного детектирования нарушенного участка трубопровода: (а) – функция ЗКН в безразмерной форме (кривая 1) и её бинаризованная форма (кривая 2); (б) – компоненты напряженности индуцированного электрического поля; (в) – индекс риска – комбинация признаков на графиках (а), (б), а также максимума функции (6); (г) – заверка выявленного аномального участка на интервале 72–75 м шурфованием (группа коррозионных язв на поверхности трубы под слоем изоляции).

функций $\delta(x)$ (рис. 4а; кривая 2). Нормировка предполагает предварительное исключение из структуры функции ЗКН тренда, аппроксимируемого кубическим многочленом. Опасным или аварийно значимым является неравновесный участок трубопровода на границе ($\pm 2,5$ м) между интервалами с нулевыми и единичными значениями $\delta(x)$,

отвечающими разнородным напряженным состояниям трубопровода, маркируемым максимумами и минимумами функции ЗКН.

Выраженная нестационарная динамика магнитного поля в окрестности упруго-пластических деформаций локального участка трубопровода означает неприменимость потенциальных аналогий в описании структуры магнитного поля, принятых в геофизике. Иными словами, для ротора напряженности $\vec{H}$ магнитного поля имеем:

$$\text{rot}(\vec{H}) = \vec{\nabla} \times \vec{H} = \mu^{-1}(\vec{\nabla} \times \vec{B}) = \vec{j}^+ + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\text{rot}(\vec{H}) = \left(\frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \vec{e}_x + \left(\frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) \vec{e}_y + \left(\frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial x} \right) \vec{e}_z, \quad (4)$$

где набор ортов $\vec{e}_x$, $\vec{e}_y$, $\vec{e}_z$ по соответствующим координатным осям привязаны к оси трубопровода, ε – диэлектрическая проницаемость вмещающей среды, μ – магнитная проницаемость вмещающей среды, $\vec{E}$ – напряженность электрического поля, $\vec{j}^+$ – плотность тока проводимости. Частные производные в (4) являются собой измеряемые пространственные градиенты компонент $\vec{B}$. Таким образом, вихревая составляющая магнитного поля может быть оценена численно. С учетом этого в пересчете магнитного поля в электрическое поле допустим, что в отсутствие токов проводимости на нарушенных участках трубопровода первое слагаемое в (3) равно нулю при ненулевых токах смещения, т.е.

$$\text{rot}(\vec{B}) = (\varepsilon/\mu) \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}.$$

Параметры диэлектрической ε и магнитной μ проницаемостей априори неизвестны, а поскольку труба первично изготовлена из однородного сплава и погружена в квазиоднородный грунт, то принимаем $(\varepsilon/\mu) = \text{const}$, что даёт:

$$E_x \approx \int (\vec{\nabla} \times \vec{B})_x dt, \quad E_y \approx \int (\vec{\nabla} \times \vec{B})_y dt, \quad E_z \approx \int (\vec{\nabla} \times \vec{B})_z dt. \quad (5)$$

Приближенный расчет E_x , E_y , E_z на основе разности пространственных градиентов и взятия от них временного интеграла возможно в силу малой степени дискретизации магнитного поля. Считаем, что стационарная диполь-дипольная структура намагничивания трубопровода проявлена на интервалах от 2,5 метров (минимальный размер аномально напряженной области трубопровода) до 11,3 метров (длина отдельного сегмента трубопровода) и более (при однонаправленно намагниченных соседних сегментах трубопровода). Тогда при малых шагах дискретизации (в нашем опыте – порядка первых сантиметров) можем говорить об аналогии с временной нестационарностью магнитного поля (рис. 4б). Детектирование прогнозных пучностей в семействе нормализованных кривых E_x , E_y , E_z , как функций координат по оси профиля, опирается на аналогию с дивергенцией векторного поля:

$$\left(\left(\frac{d}{dx} \right) \frac{\vec{r}_x}{r_x} \cdot \vec{E} \right) = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial x} + \frac{\partial E_z}{\partial x}. \quad (6)$$

Максимумы сглаженной численной оценки оператора (6) с протяженностью от 2,5 до 5 метров, при их совпадении с пучностями на рис. 4б и с максимумами функции ЗКН позволяют в отсутствие экспертного участия осуществить детектирование нарушенных участков трубопровода (рис. 4в). Для разнесения малорисковых и высокорисковых позиций, а также для упрощения структуры графика принято решение малорисковые маркеры на рис. 4в вынести в область отрицательных пиков (отвечает маркерам (–1) и (–2)), а высокорисковый маркер – в область положительных пиков (отвечает маркеру 3). Визуальный анализ позволяет обнаружить близрасположенные низкорисковые маркеры (обязательно – с разными значениями). Они могут быть выделены как воз-

возможные области интенсивной нарушенности стенки трубы, неконтрастно проявленные в структуре измеренного магнитного поля и его трансформант [Lebedev and Deev, 2023].

Дискуссии

На фоне научно-методических составляющих обсуждаемой проблемы первичным посылом к написанию статьи оказалась дискуссия в производственной и в коллегийной среде касательно эффективности пассивной магнитометрии в неразрушающем контроле погруженного трубопровода [Быков и др., 2020; Adegboye et al., 2019]. Во-первых, на конференциях и на технических совещаниях утверждают, что аномальные отклики в магнитном поле, порождаемые нарушенными участками стенки трубы, затухают на расстоянии нескольких сантиметров от стенки, тогда как расстояние феррозондов до объекта (дефектов в стенке трубы, зон упруго-пластической деформации трубы) составляет от полутора метров и более. Во-вторых, заявляют, что модель диполь-дипольной структуры трубопровода является малоприменимой на практике в силу исключительно неоднородной намагниченности сегментов трубопровода. В-третьих, указывают, что в нефтегазовой отрасли уже имеется зарекомендовавший себя цифровой образ трубопровода опирающийся на данные ультразвуковой толщинометрии.

Наш подход к заявленным проблемным аспектам станем развивать в рамках апробированной методологии, приведенной ранее. В части первого замечания: неразрушающий магнитометрический контроль и лежащий в его основе метод магнитной памяти металла на сегодняшний день нельзя назвать новой и сырой разработкой – подход сертифицирован и обеспечен как комплектом патентов [Марков, 2019], так и публикациями в рецензируемых изданиях [Бахарев, 2004; Толстов, 2019]. В рамках этой апробации известно, что в статическом приближении отклики во внешнем магнитном поле от локальных дефектов (утонений стенки трубопровода) проявлены в их малой окрестности (первые сантиметры). Для простейшей модели $\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$, где μ_r – относительная магнитная проницаемость, при индуцированной намагниченности ферромагнитной трубы и парамагнитных свойствах вмещающей среды и транспортируемого продукта, решаем численно уравнение неразрывности

$$-\vec{\nabla} \cdot (\mu_r \mu_0 \vec{\nabla} \varphi) = -\text{div}(\mu_r \mu_0 \text{grad}(\varphi)) = 0,$$

где φ – скалярный потенциал стационарного магнитного поля. Модельным объектом задан участок трубы с внешним радиусом 300 мм и толщиной стенок 6 мм, изготовленным из малоуглеродистой стали. Относительную магнитную проницаемость внутри и вне трубы задаем единичной, а величину μ_r стенок варьируем в пределах первых десятков единиц СИ. Принимаем вектор магнитной индукции внешнего поля параллельным поверхности трубы, а его модуль равным 40 мкТл. В итоге даже такого упрощенного моделирования получаем подтверждение ранее экспериментально выявленных фактов:

- наличие поля рассеяния на дефекте, образующего подобие поля диполя (рис. 5а);
- быстрое убывание возмущения внешнего магнитного поля от дефекта к оси трубы (рис. 5а, 5б);
- наличие незначительных, но ненулевых возмущений магнитного поля за пределами трубы (рис. 5а) в окрестности локального дефекта.

Напомним: возникновение локального утонения в стенке трубы редко является самостоятельным эффектом и, как правило, ассоциируется с макроскопическими и/или вторичными физическими эффектами другого порядка (см. выше). В отсутствие возможности корректно сформировать численную модель откликов совокупности этих «надпорядковых» эффектов во внешнем магнитном поле, можно утверждать макроскопический характер данных откликов. Вдобавок, локальные дефекты в стенке трубы относительно редки:

- коррозионные язвы образуют группы площадью от нескольких квадратных сантиметров и более;

- часты цепочки дефектов изометричной формы (очаги питтинговой коррозии), нередко отличные от локальных дефекты сварного стыка (грубая чешуйчатость, наплавления, непровар).

Модель магнитостатического отклика группы дефектов на рис. 5в, как суперпозиции откликов группы диполей, закономерно показывает более значимое по амплитуде возмущение, проявляемое во внешнем поле на гораздо большем расстоянии, чем в случае локального дефекта.

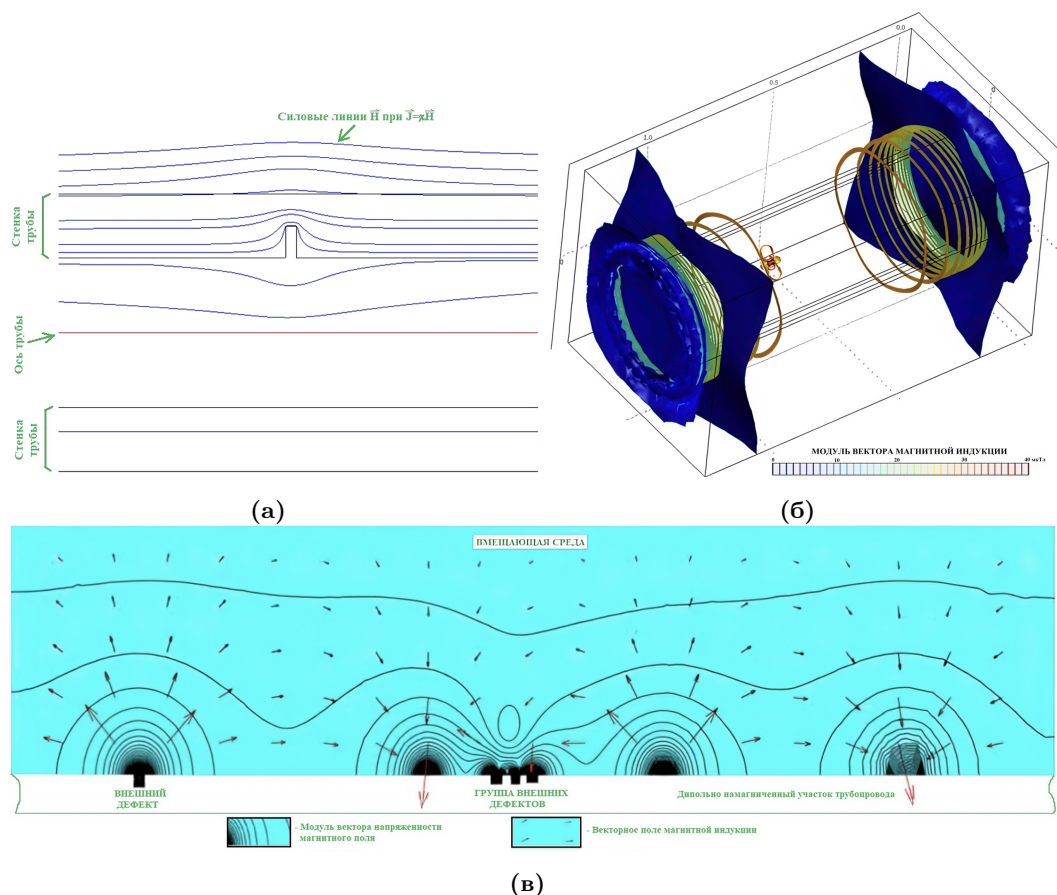


Рис. 5. Моделирование откликов во внешнем магнитном поле от одного ((а) – в двухмерном, (б) – в трехмерном случае) или от группы (в) дефектов. На рис. 6 дефект дан в средней части трубы при отображении структуры модуля вектора магнитной индукции изоповерхностями. На рис. 6 на фоне дипольной структуры трубы дано сопоставление откликов от одного (слева) и от группы внешних дефектов (в центре) при отображении скалярного поля модуля вектора напряженности магнитного поля в форме изолиний и векторного поля магнитной индукции.

Рассмотрим теперь второе замечание, а именно – обоснование диполь-дипольной структуры неоднородно намагниченного погруженного трубопровода. Здесь уместно привести цитату: «Решение прямой задачи магниторазведки основано на предположении, что любое намагниченное тело можно рассматривать как систему бесконечно большого числа магнитных диполей с упорядоченно расположенными осями магнитных моментов.» [Брюсов, 1990]. В нашей задаче речь пойдет о конечной системе макроскопических диполей, аппроксимирующих намагниченное состояние погруженного трубопровода.

Выявление этих диполей опирается на количественную интерпретацию вертикальной компоненты Z_a вектора $\vec{B}$:

- фиксирующие Z_a вертикальные феррозонды в своих реакциях на внешнее возбуждение свободны от привязки ориентации антенного блока к оси трубопровода;

- применение в нашей практике метода неразрушающего контроля в относительно высоких широтах позволяет определить Z_a как наиболее интенсивную компоненту $\vec{B}$;
- количественная интерпретация здесь сводится к итерационному (в цикле) решению прямой задачи с минимизацией отклонения наблюдаемого сигнала Z_a от модельной кривой $(Z_a)_m$;
- моделью источника здесь фигурируют горизонтальные магнитные диполи в теле подземного трубопровода, а отклонение от магнитного отклика от отклика горизонтального диполя связывается с накопленными воздействиями на трубопровод.

Источники заданы в характерном для магистральных трубопроводов интервале глубин от 0,8 до 1,8 м в пределах измерительного профиля длиной 100 м. Вмещающую среду полагаем немагнитной. В качестве первичного приближения длину диполей считаем равной 11,3 м (длине отдельного сегмента трубопровода). В процессе подбора длину диполей и их число варьируем, применяя аналитическое решение прямой задачи для горизонтального пласта, намагниченного по оси [Любчик, 2012] (рис. 6):

$$Z_a = 2M \frac{h^2 + b^2 - x^2}{[h^2 + (x + b)^2] \cdot [h^2 + (x - b)^2]},$$

где b – полуширина отдельного диполя, h – глубина залегания его геометрического центра, x – текущая координата по линии измерительного профиля относительно начала координат, совпадающего с проекцией геометрического центра диполя на линию профиля, $M = 2b \cdot 2h \cdot |\vec{J}|$ – магнитный момент диполя, $\vec{J}$ – вектор намагниченности. Несмотря на всю условность избранного модельного образа трубопровода, из рис. 6 можно видеть подчиненность низкочастотной составляющей измеренной Z_a суперпозиции модельных дипольных откликов $(Z_a)_m$. Средняя невязка модельного и наблюдаемого сигналов составляет порядка 800 нТл при динамическом диапазоне натурального сигнала порядка 10 000 нТл, т.е. менее 10%, что демонстрирует представительность подбора. Таким образом, обоснована диполь-дипольная структура трубопровода, обеспеченная как исходной намагниченностью его сегментов, так и наложенными процессами. Детерминизм диполь-дипольной структуры погруженного трубопровода делает представительными все перечисленные выше параметризации измеренных его откликов во внешнем магнитном поле.

Переходим к третьему вопросу о степени дублирования цифрового образа трубопроводов, формируемого при бесконтактной магнитометрии [ГОСТ 17410-2022, 2022; ГОСТ Р ИСО 10543-99, 2005; Марков, 2019] и при ультразвуковой толщинометрии (УЗ-тм) [Khalaf et al., 2023; Takadze and Takadze, 2023; Xie et al., 2015]. Ключевым элементом во втором случае выступает обобщение данных контактной дефектоскопии, производимой по отдельным сечениям трубопровода. Отмеченные сечения вскрываются шурфами с пространственным шагом вдоль оси трубопровода, варьируемым в зависимости от частоты аварий.

По результатам актуализации УЗ-тм выполняется пространственное интерполирование этих данных как в пределах отдельного сечения, так и между соседними сечениями с выявлением зон предкритических и критических утонений стенки трубы при последующем планировании ремонтных мероприятий. Очевидна высокая пространственная дискретизация оценок и их высокая себестоимость, что делает актуальными более мобильные, менее затратные мониторинговые оценки, обладающие гораздо меньшим пространственным шагом детектирования по оси трубопровода, нежели шаг его сечений для УЗ-тм. Базовым свойством такого мониторинга выступает подобие соотношения неопределенностей: рост скорости движения КБД (комплекса бесконтактной диагностики на базе магнитометра-градиентометра) и дистанцирование его сенсоров от подземного трубопровода уменьшает точность позиционирования нарушенных участков объекта. В соответствии с нормативной документацией [ГОСТ 17410-2022, 2022; ГОСТ Р ИСО 10543-99, 2005] инструментальные оценки, опирающиеся на метод магнитной

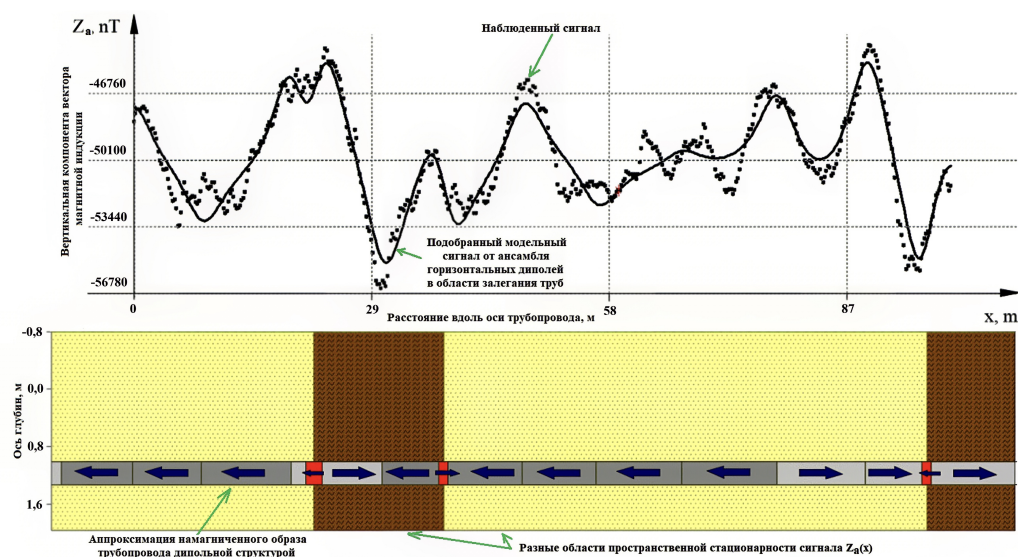


Рис. 6. Результат подбора измеренных значений Z_a (даны на верхнем графике точками) модельной кривой $(Z_a)_m$ (непрерывная черная кривая на верхнем графике) системой горизонтальных диполей (обозначены в пределах серой полосы в плоскости параметрического разреза). Красным обозначены горизонтальные диполи в области нарушения пространственной стационарности магнитометрического сигнала.

памяти металла, носят характер предварительных. Они ориентированы на выделение аномальных зон с последующей их детализацией контактными методами.

Завершая дискуссионный раздел, отметим наличие в рассматриваемом направлении изысканий гораздо более широкого круга задач, ждущих своего разрешения. Например, девять пространственных градиентов по трём компонентам $\vec{B}$ образуют матрицу 3×3 (градиентный тензор), определитель которой в большинстве точек измерений отличен от нуля, что противоречит концепции потенциальности магнитного поля, принятого в магниторазведке. В качестве другого примера можно привести нечёткое определение объекта исследований в пассивном магнитометрическом методе неразрушающего контроля. Решение этих и прочих проблем относятся к перспективам развития и повышения качества рассматриваемого метода [Шпенст и Орел, 2021; Shammazov et al., 2023].

Заключение

Трубопроводная инфраструктура для транспортировки первичного углеводородного сырья, а также продуктов его переработки, выступает одной из самых протяженных в нефте- и газодобывающих странах [Блинов и Садыков, 2023; Блинов и др., 2024]. С учетом этого, а также среднего времени её эксплуатации, превышающего безаварийный период, эффективный метод мониторинга этой инфраструктуры весьма востребован. Под «эффективностью» понимаем повышенную производительность неразрушающего метода контроля, представительный срок его эксплуатации (более 20 лет), независимость метода от геометрии трубопровода и от его функционирования. Именно таким методом и выступает неразрушающий магнитометрический контроль на основе КБД. Учитывая потенциально большие объёмы мониторинговых работ, оптимально здесь иметь, помимо интерактивных средств разбраковки результатов интерпретации данных КБД, средства автоматизированной локализации нарушенных участков трубопровода. Комбинация этих средств составляет рабочее ядро АРМД, в основе которого заложена физико-математическая модель образа этих нарушенных участков, включающая:

- модель диполь-дипольной структуры намагниченности тела трубопровода;
- численную оценку нестационарности внешнего магнитного поля в области упруго-пластических деформаций тела трубопровода;

- учёт сосуществования потенциальной и вихревой компонент магнитного поля, где последняя обусловлена индуцированным электрическим полем от макроскопических и/или наложенных эффектов (магнитоупругости, коррозии и проч.).

В рассмотренной системе обработки, опирающейся на заявленный образ, присутствуют все элементы интерпретации:

- качественный анализ, включающий в себя фильтрацию и экспертное ранжирование;
- количественный анализ, как реконструкция глубинного образа трубопровода;
- прогнозная автоматизированная составляющая.

Вместе с тем, дальнейшее развитие рабочего ядра АРМД видится в решении следующих задач:

- разработку оптимальных фильтров, допускающих узкополосное подавление высокочастотной компоненты, корректировку амплитуды интенсивных аperiodических пиков сигнала от сторонних источников и выравнивание динамического диапазона полезной части сигнала;
- автоматизацию количественной интерпретации, ориентированной на получение глубинного образа геотехнического объекта в условиях минимума априорной информации, либо её отсутствия [ГОСТ Р ИСО 24497, 2010; Ермохин, 2009];
- развитие прогнозных оценок при формировании иерархической базы данных по сигналам от трубопровода и по дефектам его тела с дополнением распознавания без обучения распознаванием по эталонам.

Список литературы

- Альбанова Е. В., Крапивский Е. И., Некучаев В. О. Исследование возможностей оценки технического состояния трубопроводов с помощью магнитных методов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. — 2005. — № 11. — С. 9—12. — EDN: [HVKTKR](#).
- Бахарев М. С. Разработка методов и средств измерения механических напряжений на основе необратимых и квазиобратимых магнитоупругих явлений: дис. ... докт. тех. наук. — Тюмень : Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2004. — 321 с. — EDN: [NNIGBX](#).
- Блинов П. А., Садыков М. И. Оценка упруго-прочностных свойств цементно-эпоксидных систем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — Т. 334, № 1. — С. 97—105. — DOI: [10.18799/24131830/2023/1/3925](#).
- Блинов П. А., Садыков М. И., Гореликов В. Г. и др. Разработка и исследование тампонажных составов с улучшенными упруго-прочностными свойствами для крепления нефтяных и газовых скважин // Записки Горного института. — 2024. — EDN: [OWJFHS](#).
- Боровко Н. Н. Оптимизация геофизических исследований при поисках рудных месторождений. — Ленинград : Недра, 1979. — 230 с.
- Брюсов Б. А. Магниторазведка. Справочник геофизика : Глава XI. Элементы математической теории намагниченных тел / под ред. В. Е. Никитского, Ю. С. Глебовского. — М. : Недра, 1990. — 470 с.
- Быков И. Ю., Борейко Д. А., Смирнов А. Л. и др. Опыт использования экспресс-методов неразрушающего контроля для оценки технического состояния запорно-регулирующей арматуры // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. — 2020. — № 1. — С. 14—18. — DOI: [10.33285/1999-6934-2020-1\(115\)-14-18](#).
- Власов В. Т., Дубов А. А. Физические основы метода магнитной памяти металла. — Москва : Тиссо, 2004. — 424 с. — EDN: [QMZPVZ](#).
- ГОСТ 17410-2022. Контроль неразрушающий. Трубы металлические бесшовные. Методы ультразвуковой дефектоскопии. — Москва : ФГБУ "РСТ", 2022. — 30 с.
- ГОСТ Р ИСО 10543-99. Трубы стальные напорные бесшовные и сварные горячечатные. Метод ультразвуковой толщинометрии. — Москва : ИПК Издательство стандартов, 2005. — 10 с.
- ГОСТ Р ИСО 24497. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 1-3. — Москва : Стандартинформ, 2010.
- ГОСТ Р ИСО 6385-2007. Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем. — Москва : Стандартинформ, 2007. — 12 с.

- Долгаль А. С., Христенко Л. А. Результаты и перспективы геофизических исследований при поисках рудного золота на восточном склоне Кузнецкого Алатау // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. — 2008. — Т. 2, № 12. — С. 48–60.
- Дубов А. А. Методика контроля труб поверхностей нагрева паровых и водогрейных котлов с использованием магнитной памяти металла // Теплоэнергетика. — 1998. — № 1. — С. 53–56. — EDN: [WNFXZB](#).
- Дубов А. А., Дубов А. А., Колокольников С. М. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: Учебное пособие. — Москва : Спектр, 2012. — 395 с. — EDN: [QMLUZF](#).
- Ермохин К. М. Аналитическое продолжение геофизических полей методом цепных дробей // Записки Горного института. — 2009. — Т. 183. — С. 238–241. — EDN: [KZECFN](#).
- Любчик А. Н. Способ дистанционного магнитометрического контроля технического состояния магистральных трубопроводов // Записки Горного института. — 2012. — Т. 195. — С. 268–271. — EDN: [QZEPFJ](#).
- Марков А. А. Магнитная система сканера-дефектоскопа. Описание изобретения к патенту RU 2680103C2. — Москва : Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2019. — 15 с.
- Мовчан И. Б., Шайгаллямова З. И., Яковлева А. А. Выявление факторов структурного контроля коренных золоторудных проявлений методом беспилотной аэромагниторазведки на примере Нерюнгринского района Якутии // Записки Горного института. — 2022. — Т. 254. — С. 217–233. — DOI: [10.31897/pmi.2022.23](#).
- Новожилов В. В. Теория упругости. — Санкт-Петербург : Политехника, 2012. — 409 с.
- Толстов А. Е. Совершенствование методов оценки технического состояния участков магистральных трубопроводов, содержащих расслоения металла: дис. ... канд. тех. наук. — Москва : Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ, 2019. — 173 с. — EDN: [RXWEPW](#).
- Шпенст В. А., Орел Е. А. Повышение надежности вторичного источника питания постоянного тока резервированием сигналов обратной связи // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2021. — Т. 64, № 5. — С. 408–420. — DOI: [10.21122/1029-7448-2021-64-5-408-420](#).
- Щипачев А. М., Алжадли М. Магнитно-импульсная обработка для повышения прочностных свойств дефектных участков нефте- и газопроводов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — Т. 334, № 5. — С. 7–16. — DOI: [10.18799/24131830/2023/5/4011](#).
- Adegbeye M. A., Fung W. K., Karnik A. Recent Advances in Pipeline Monitoring and Oil Leakage Detection Technologies: Principles and Approaches // Sensors. — 2019. — Vol. 19, no. 11. — DOI: [10.3390/s19112548](#).
- Bazhin V. Y., Masko O. N., Nguyen H. H. Increasing the speed of information transfer and operational decision-making in metallurgical industry through an industrial bot // Non-ferrous Metals. — 2023. — No. 1. — P. 62–67. — DOI: [10.17580/nfm.2023.01.10](#).
- Kalinin D. F., Egorov A. S., Bolshakova N. V. Oil and Gas Potential of the West Kamchatka Coast and Its Relation to the Structural and Tectonic Setting of the Sea of Okhotsk Region Based on Geophysical Data // Russian Journal of Pacific Geology. — 2023. — Vol. 17, S2. — S21–S34. — DOI: [10.1134/s1819714023080067](#).
- Khalaf A. H., Xiao Y., Xu N., et al. Emerging AI technologies for corrosion monitoring in oil and gas industry: A comprehensive review // Engineering Failure Analysis. — 2023. — Vol. 155. — DOI: [10.1016/j.engfailanal.2023.107735](#).
- Kiani I., Chikweri I. Structural analysis of total magnetic intensity map of parts of Degema, River's state, Nigeria, using Oasis Montag geophysical computer software // FNAS Journal of Scientific Innovations. — 2021. — Vol. 3, no. 1. — P. 70–75.
- Kronmüller H., Seeger A. Solution of the Micromagnetic Equations of Superconductors // Physica Status Solidi (b). — 1969. — Vol. 34, no. 2. — P. 781–796. — DOI: [10.1002/pssb.19690340241](#).
- Lebedev V., Deev A. Heat Storage as a Way to Increase Energy Efficiency and Flexibility of NPP in Isolated Power System // Applied Sciences. — 2023. — Vol. 13, no. 24. — DOI: [10.3390/app132413130](#).
- Litvinenko V. S. Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector // Natural Resources Research. — 2019. — Vol. 29, no. 3. — P. 1521–1541. — DOI: [10.1007/s11053-019-09568-4](#).
- Nguyen H. H., Bazhin V. Y. Optimization of the Control System for Electrolytic Copper Refining with Digital Twin During Dendritic Precipitation // Metallurgist. — 2023. — Vol. 67, no. 1/2. — P. 41–50. — DOI: [10.1007/s11015-023-01487-3](#).
- Obiora D. N., Oha I. A., Ihedike A. O., et al. Comparative depth estimates and modeling of magnetic anomalies over the Nkalagu area, Southeastern Nigeria // Modeling Earth Systems and Environment. — 2021. — Vol. 8, no. 1. — P. 1291–1309. — DOI: [10.1007/s40808-021-01155-y](#).
- Shammazov I. A., Batyrov A. M., Sidorkin D. I., et al. Study of the Effect of Cutting Frozen Soils on the Supports of Above-Ground Trunk Pipelines // Applied Sciences. — 2023. — Vol. 13, no. 5. — DOI: [10.3390/app13053139](#).

- Takadze I., Takadze G. Sing the Ultrasonic Method to Detect Fatigue Cracks in Metal Structures // Air transport. — 2023. — Vol. 17, no. 1. — P. 70–77.
- Wang Y., Li P., Li J. The monitoring approaches and non-destructive testing technologies for sewer pipelines // Water Science and Technology. — 2022. — Vol. 85, no. 10. — P. 3107–3121. — DOI: [10.2166/wst.2022.120](https://doi.org/10.2166/wst.2022.120).
- Xie F., Ji B.-H., Yuanzhonu Z., et al. Ultrasonic Detecting Method and Repair Technology Based on Fatigue Crack Features in Steel Box Girder // Journal of Performance of Constructed Facilities. — 2015. — Vol. 30, no. 2. — DOI: [10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000725](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000725).

THE PARADIGM OF A DIGITAL IMAGE OF A GEOTECHNICAL OBJECT AS THE BASIS OF AN AUTOMATED WORKSTATION IN THE TASK OF NON-DESTRUCTIVE TESTING (USING THE EXAMPLE OF A MAIN PIPELINE)

A. A. Yakovleva¹, V. V. Semenov², D. K. Medinskaya¹, I. B. Movchan¹, and Z. I. Sadykova³

¹ Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Saint Petersburg, Russia

² LTD Diagnostic Systems, Saint Petersburg, Russia

³ Geoscan Group of Companies, Saint Petersburg, Russia

****Correspondence to:** Zilya I. Sadykova, z.sadykova@geoscan.ru.

The relevance of the work is determined by the automation of monitoring processes of natural and technical systems, not so much in terms of their measurement component, but in terms of interpreting monitoring results in terms of the properties of the desired object. In this work, these are submerged pipeline systems – main oil and gas pipelines, as a special case of geotechnical objects. The goal of developing an automated workstation (AWS) for a specific object is the ultimate parameterization of the interpretation procedure and the unification of the final graphical constructions within the framework of a single digital image of main pipelines. Taking into account the deterministic type of geotechnical object and the objectives of the survey, research methods include, in addition to non-destructive magnetometric testing as a method of obtaining primary data: methods of qualitative and quantitative interpretation of multi-channel magnetometry materials; methods of systematics and graphical display of primary data and the results of their interpretation. Within the framework of approaches generally accepted in the oil and gas industry, the digital image of damaged pipeline sections is based on ideas about the thinning of pipe walls and the stress states associated with thinning zones. The stressed states of the ferromagnetic walls of immersed pipelines form specific responses in an external magnetic field, while the actual thinning of the pipeline walls is detected by contact methods. The results of the surveys are reduced to a system parametrization of magnetometric non-destructive testing data within the framework of the developed automated workplace structure. The content of the conclusions is in the development of the principle for referenceless recognition of risky sections of the pipeline as a fully automated component of diagnostician's workplace.

Keywords: automated workplace, contactless diagnostics complex, parameterization, metal magnetic memory method, non-destructive testing, submerged pipeline, qualitative and quantitative interpretation.

Citation: Yakovleva A. A., V. V. Semenov, D. K. Medinskaya, I. B. Movchan, Z. I. Sadykova (2025), The Paradigm of a Digital Image of a Geotechnical Object as the Basis of an Automated Workstation in the Task of Non-destructive Testing (Using the Example of a Main Pipeline), *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES3006, <https://doi.org/10.2205/2025ES001010>, EDN: LMLSGM

Received: 3 December 2024

Accepted: 1 April 2025

Published: 28 April 2025



© 2025. The Authors.

References

- Adegboye M. A., Fung W. K., Karnik A. Recent Advances in Pipeline Monitoring and Oil Leakage Detection Technologies: Principles and Approaches // *Sensors*. — 2019. — Vol. 19, no. 11. — DOI: [10.3390/s19112548](https://doi.org/10.3390/s19112548).
- Albanova E. V., Krapivsky E. I., Nekuchaev V. O. Research into possibilities of pipelines technical condition evaluation with magnetic methods // *Environmental protection in oil and gas complex*. — 2005. — No. 11. — P. 9–12. — EDN: [HVKTKR](https://doi.org/10.2205/2005ES001010) ; (in Russian).

- Bakharev M. S. Development of methods and means for measuring mechanical stresses based on irreversible and quasi-reversible magnetoelastic phenomena: PhD Thesis. — Tyumen : Tyumen State Oil, Gas University, 2004. — P. 321. — EDN: [NNIGBX](#) ; (in Russian).
- Bazhin V. Y., Masko O. N., Nguyen H. H. Increasing the speed of information transfer and operational decision-making in metallurgical industry through an industrial bot // *Non-ferrous Metals*. — 2023. — No. 1. — P. 62–67. — DOI: [10.17580/nfm.2023.01.10](#).
- Blinov P. A., Sadykov M. I. Evaluation of elastic-strength properties of cement-epoxy systems // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. — 2023. — Vol. 334, no. 1. — P. 97–105. — DOI: [10.18799/24131830/2023/1/3925](#). — (In Russian).
- Blinov P. A., Sadykov M. I., Gorelikov V. G., et al. Development and research of backfill compounds with improved elastic and strength properties for oil and gas well lining // *Journal of mining institute*. — 2024. — EDN: [OWJFHS](#) ; (in Russian).
- Borovko N. N. Optimization of geophysical research in the search for ore deposits. — Leningrad : Nedra, 1979. — P. 230. — (In Russian).
- Bryusov B. A. Magnetic Survey. *Geophysics Handbook* : Chapter XI. Elements of the Mathematical Theory of Magnetized Bodies / ed. by V. E. Nikitsky, Yu. S. Glebovsky. — M. : Nedra, 1990. — 470 p. — (In Russian).
- Bykov I. Yu., Boreiko D. A., Smirnov A. L., et al. Assessment of technical state of shutoff and control valves applying express methods of nondestructive monitoring // *Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*. — 2020. — No. 1. — P. 14–18. — DOI: [10.33285/1999-6934-2020-1\(115\)-14-18](#). — (In Russian).
- Dolgal A. S., Khristenko L. A. Results and development of geophysical researches for prospecting of ore gold into the Eastern flank of Kuznetsk Ala-Tau // *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center" Earth Sciences*. — 2008. — Vol. 2, no. 12. — P. 48–60. — (In Russian).
- Dubov A. A. A technique for monitoring the heating surface tubes of steam and hot-water boilers using the magnetic memory of metals // *Thermal Engineering*. — 1998. — No. 1. — P. 53–56. — EDN: [LFEGZN](#).
- Dubov A. A., Dubov A. A., Kolokolnikov S. M. Metal magnetic memory method and control devices: Tutorial. — Moscow : Spektr, 2012. — P. 395. — EDN: [QMLUZF](#) ; (in Russian).
- Ermokhin K. M. Analytical continuation of geophysical fields by continued fractions method // *Journal of mining institute*. — 2009. — Vol. 183. — P. 238–241. — EDN: [KZECFN](#) ; (in Russian).
- GOST 17410-2022. Non-destructive testing. Metal seamless pipes and tubes. Ultrasonic methods of defect detection. — Moscow : FSBI "RST", 2022. — P. 30. — (In Russian).
- GOST R ISO 10543-99. Seamless and hot-stretch-reduced welded steel tubes for pressure purposes. Ultrasonic thickness testing. — Moscow : IPC Publishing House of Standards, 2005. — P. 10. — (In Russian).
- GOST R ISO 24497. Non-destructive testing. Metal magnetic memory method. Part 1-3. — Moscow : Standartinform, 2010. — (In Russian).
- GOST R ISO 6385-2007. Ergonomics. Ergonomic principles in the design of work systems. — Moscow : Standartinform, 2007. — P. 12. — (In Russian).
- Kalinin D. F., Egorov A. S., Bolshakova N. V. Oil and Gas Potential of the West Kamchatka Coast and Its Relation to the Structural and Tectonic Setting of the Sea of Okhotsk Region Based on Geophysical Data // *Russian Journal of Pacific Geology*. — 2023. — Vol. 17, S2. — S21–S34. — DOI: [10.1134/s1819714023080067](#).
- Khalaf A. H., Xiao Y., Xu N., et al. Emerging AI technologies for corrosion monitoring in oil and gas industry: A comprehensive review // *Engineering Failure Analysis*. — 2023. — Vol. 155. — DOI: [10.1016/j.engfailanal.2023.107735](#).
- Kiani I., Chikweri I. Structural analysis of total magnetic intensity map of parts of Degema, River's state, Nigeria, using Oasis Montag geophysical computer software // *FNAS Journal of Scientific Innovations*. — 2021. — Vol. 3, no. 1. — P. 70–75.
- Kronmüller H., Seeger A. Solution of the Micromagnetic Equations of Superconductors // *Physica Status Solidi (b)*. — 1969. — Vol. 34, no. 2. — P. 781–796. — DOI: [10.1002/pssb.19690340241](#).
- Lebedev V., Deev A. Heat Storage as a Way to Increase Energy Efficiency and Flexibility of NPP in Isolated Power System // *Applied Sciences*. — 2023. — Vol. 13, no. 24. — DOI: [10.3390/app132413130](#).
- Litvinenko V. S. Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector // *Natural Resources Research*. — 2019. — Vol. 29, no. 3. — P. 1521–1541. — DOI: [10.1007/s11053-019-09568-4](#).
- Lyubchik A. N. Way remote magnetometric control of the technical condition of the main pipelines // *The Proceedings of the Mining Institute*. — 2012. — Vol. 195. — P. 268–271. — EDN: [QZEPFJ](#) ; (in Russian).
- Markov A. A. Magnetic system of scanner-inspection device. Abstract of invention RU 2680103C2. — Moscow : Federal service for intellectual property, 2019. — P. 15. — (In Russian).

- Movchan I. B., Shaigallyamova Z. I., Yakovleva A. A. Identification of structural control factors of primary gold ore occurrences by method of unmanned aeromagnetic survey by the example of the Neryungriskiy district of Yakutia // Journal of Mining Institute. — 2022. — Vol. 254. — P. 217–233. — DOI: [10.31897/pmi.2022.23](https://doi.org/10.31897/pmi.2022.23).
- Nguyen H. H., Bazhin V. Y. Optimization of the Control System for Electrolytic Copper Refining with Digital Twin During Dendritic Precipitation // Metallurgist. — 2023. — Vol. 67, no. 1/2. — P. 41–50. — DOI: [10.1007/s11015-023-01487-3](https://doi.org/10.1007/s11015-023-01487-3).
- Novozhilov V. V. Theory of elasticity. — Saint Petersburg : Politekhnik, 2012. — P. 409. — (In Russian).
- Obiora D. N., Oha I. A., Ihedike A. O., et al. Comparative depth estimates and modeling of magnetic anomalies over the Nkalagu area, Southeastern Nigeria // Modeling Earth Systems and Environment. — 2021. — Vol. 8, no. 1. — P. 1291–1309. — DOI: [10.1007/s40808-021-01155-y](https://doi.org/10.1007/s40808-021-01155-y).
- Shammazov I. A., Batyrov A. M., Sidorkin D. I., et al. Study of the Effect of Cutting Frozen Soils on the Supports of Above-Ground Trunk Pipelines // Applied Sciences. — 2023. — Vol. 13, no. 5. — DOI: [10.3390/app13053139](https://doi.org/10.3390/app13053139).
- Shchipachev A. M., Alzhadli M. Magnetic-pulsed treatment to improve the strength properties of defective sections of oil and gas pipelines // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. — 2023. — Vol. 334, no. 5. — P. 7–16. — DOI: [10.18799/24131830/2023/5/4011](https://doi.org/10.18799/24131830/2023/5/4011). — (In Russian).
- Shpenst V. A., Orel E. A. Improving the Reliability of DC-DC Power Supply by Reserving Feedback Signals // ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. — 2021. — Vol. 64, no. 5. — P. 408–420. — DOI: [10.21122/1029-7448-2021-64-5-408-420](https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-408-420). — (In Russian).
- Takadze I., Takadze G. Sing the Ultrasonic Method to Detect Fatigue Cracks in Metal Structures // Air transport. — 2023. — Vol. 17, no. 1. — P. 70–77.
- Tolstov A. E. Improving the methods for assessing the technical condition of sections of main pipelines containing metal delamination: PhD Thesis. — Moscow : Research Institute of Natural Gases, Gas Technologies - Gazprom VNIIGAZ, 2019. — P. 173. — EDN: [RXWEPW](https://www.edn.ru/rxwepw) ; (in Russian).
- Vlasov V. T., Dubov A. A. Physical foundations of the method of magnetic memory of metal. — Moscow : Tisso, 2004. — P. 424. — EDN: [QMZPVZ](https://www.edn.ru/qmzpvz) ; (in Russian).
- Wang Y., Li P., Li J. The monitoring approaches and non-destructive testing technologies for sewer pipelines // Water Science and Technology. — 2022. — Vol. 85, no. 10. — P. 3107–3121. — DOI: [10.2166/wst.2022.120](https://doi.org/10.2166/wst.2022.120).
- Xie F., Ji B.-H., Yuanzhonu Z., et al. Ultrasonic Detecting Method and Repair Technology Based on Fatigue Crack Features in Steel Box Girder // Journal of Performance of Constructed Facilities. — 2015. — Vol. 30, no. 2. — DOI: [10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000725](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000725).