



УДК 550.837; 621.317.42

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ ПО ДЕФЕКТОСКОПИИ ТРУБЫ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРОЙ

Д. А. Арутюнян<sup>1</sup>, А. Д. Шклярчук<sup>1</sup>, А. А. Брагина<sup>1,2</sup>, А. Ю. Паленов<sup>2</sup>, Е. Д. Аникина<sup>1</sup>, П. Д. Медведев<sup>2</sup>,  
В. С. Линович<sup>1</sup>, Г. С. Белов<sup>1</sup>, М. В. Коломин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ИПГ), Москва, Россия

<sup>2</sup>Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В статье приведены результаты работ по дефектоскопии трубопровода, полученные при проведении синхронных измерений магнитного поля на территории геофизической базы МГУ в д. Александровка, Калужской области. В качестве тестируемой аппаратуры представлен экспериментальный образец магнитометра-градиентометра разработки ФГБУ «ИПГ». Представлены результативные графики измерительной информации и произведен анализ особенностей полученных результатов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** МАГНИТОМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА, ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ, МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ (МПЗ), МАГНИТОСФЕРА, ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

EDN: JHJJOU

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из наиболее актуальных и быстро развивающихся направлений является создание новой геофизической аппаратуры, которая превосходит существующие отечественные и зарубежные модели по своим характеристикам. Магнитометрические исследования являются одними из основных при изучении Земли и околоземного космического пространства. Одной из ветвей этих исследований является поисковый метод – магниторазведка, которая применяется при поиске полезных ископаемых, затонувших объектов, а также при других инженерных задачах [Булычев и др., 2006; Модин и др., 2007, Коснырева и др., 2020]. Одной из таких задач является определение местоположения трубопровода и имеющихся у него дефектов по измерениям магнитного поля.

Сотрудниками ФГБУ «ИПГ» в начале 2023 года была разработана отечественная магнитометрическая аппаратура – трёхкомпонентный феррозондовый магнитометр. Данная аппаратура дважды проходила полевые испытания для доработок и усовершенствования технологического решения [Вишняков и др., 2023; Брагина и др., 2024].

На первом этапе, осенью 2023 года, проводились работы на территории полевой экспериментальной базы «Электроугли» (ПЭБ «Электроугли») Росгидромета. Была поставлена задача сличения данных экспериментального образца и магнитовариационной станции «КВАРЦ-4».

Электронная почта авторов для переписки:

Арутюнян Давид Артурович, e-mail: arutyunyan@ipg.geospace.ru



<https://elibrary.ru/jhijou>

Адрес редакции журнала  
«Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»  
129128; Россия, Москва  
ул. Ростокинская, 9.  
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

На втором этапе полевые исследования проводились в обсерватории с отсутствием магнитных помех – на геофизической базе МГУ в д. Александровка, Калужской области. Была поставлена задача сличения данных экспериментального образца с магнитометром LEMI (USA) и MMPOS (УрФУ).

В сентябре 2024 года на территории геофизической базы МГУ имени М.В. Ломоносова в д. Александровка, Калужской области, проводились работы по выявлению дефектов на имитации трубопровода.

## 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения эксперимента производилась сварка 6 секций трубопровода длиной 2 м в единую магистраль длиной 12 м (рис. 1). Дефектоскопией в данном эксперименте является измерение отклонений от нормального состояния магистрали (до внесения деформаций). Для данного эксперимента был разработан магнитометр-градиентометр с двумя феррозондовыми трёхкомпонентными датчиками (рис. 2), находящимися на расстоянии 1 метр друг от друга.

В ходе эксперимента использовались следующие параметры съемки:

- режим – непрерывный со скоростью 1 м/с.
- количество профилей – 1 (проход профиля осуществлялся в обе стороны);
- положение профиля – по простираю трубопровода;
- высота съемки – от 1 до 2 м (рис. 3-6).

Начало и конец измерений магнитометром производился на выносах от трубопровода на расстоянии 5 м.

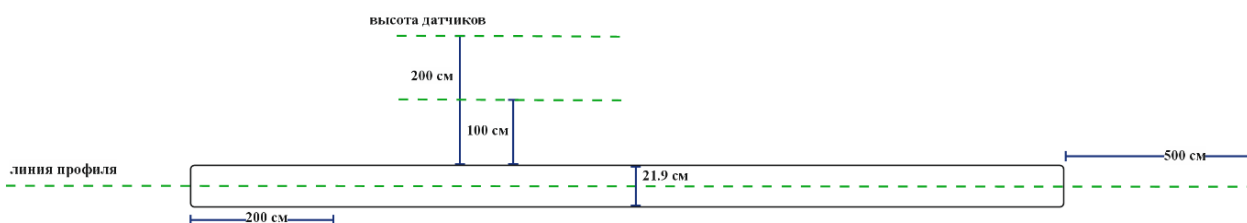


Рис. 1. Схематическое расположение трубопроводов с нанесенными профилями наблюдений (зеленые пунктирные линии)



Рис. 2. Магнитометр-градиентометр с двумя феррозондовыми трёхкомпонентными датчиками

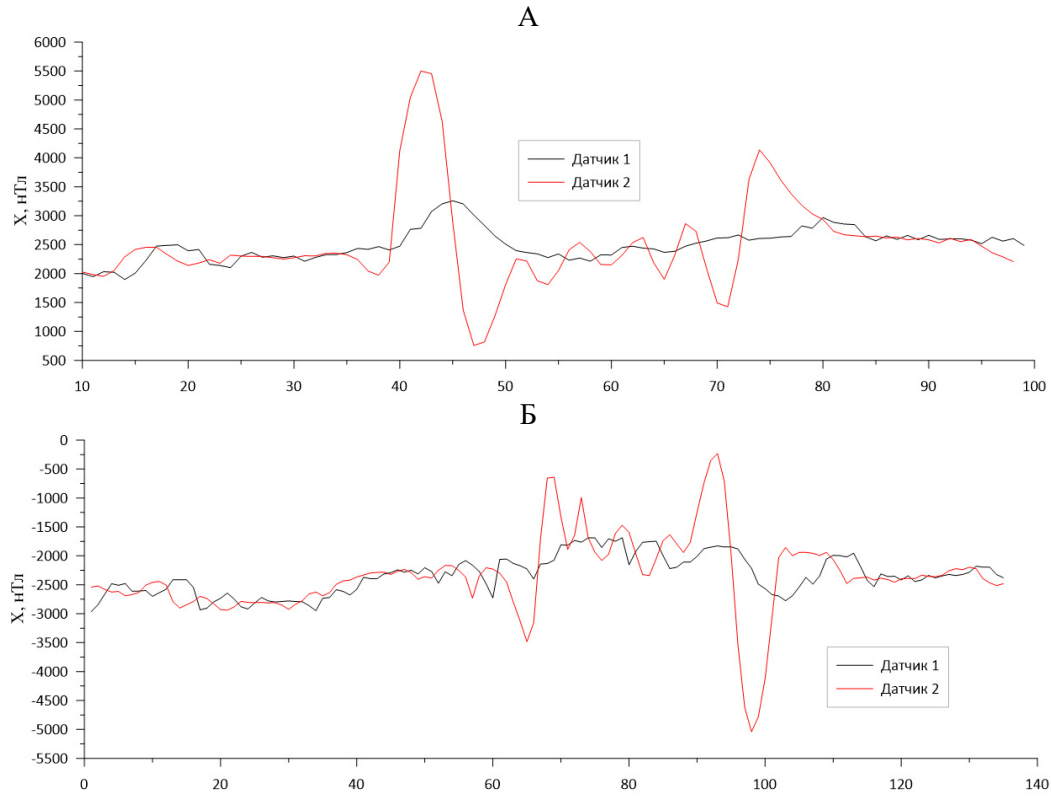


Рис. 3. Измерения вдоль трубопровода в прямом (А) и обратном (Б) направлении по компоненте X после сварки

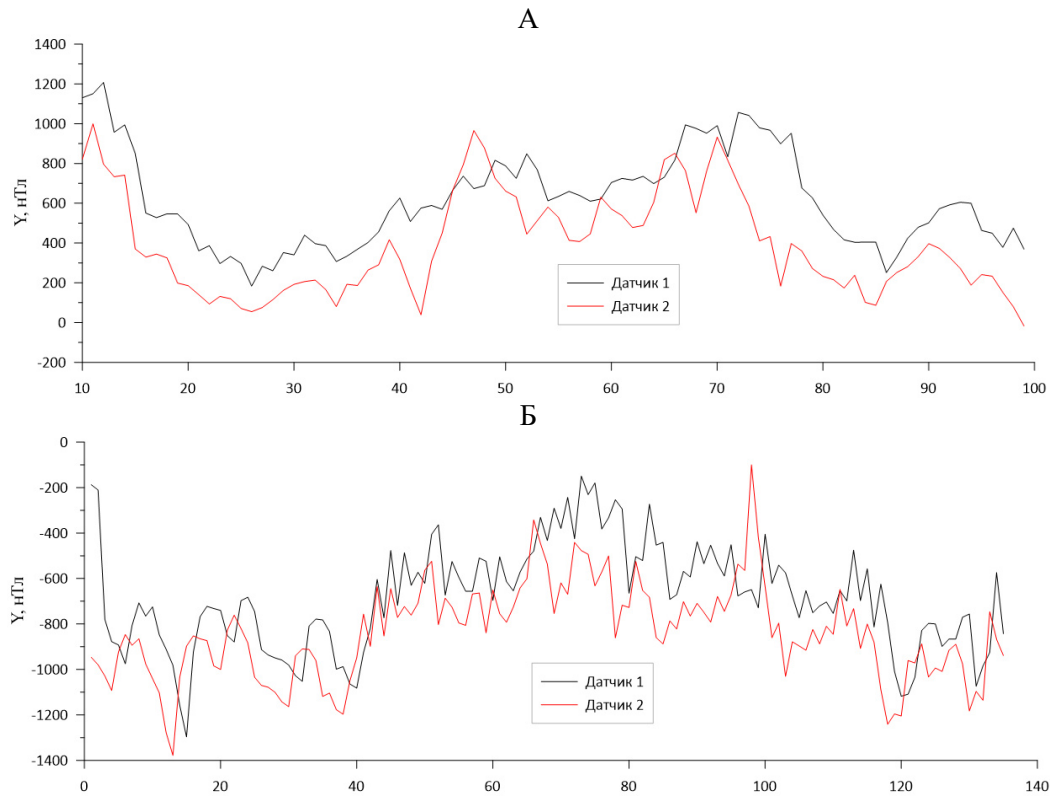


Рис. 4. Измерения вдоль трубопровода в прямом (А) и обратном (Б) направлении по компоненте Y после сварки

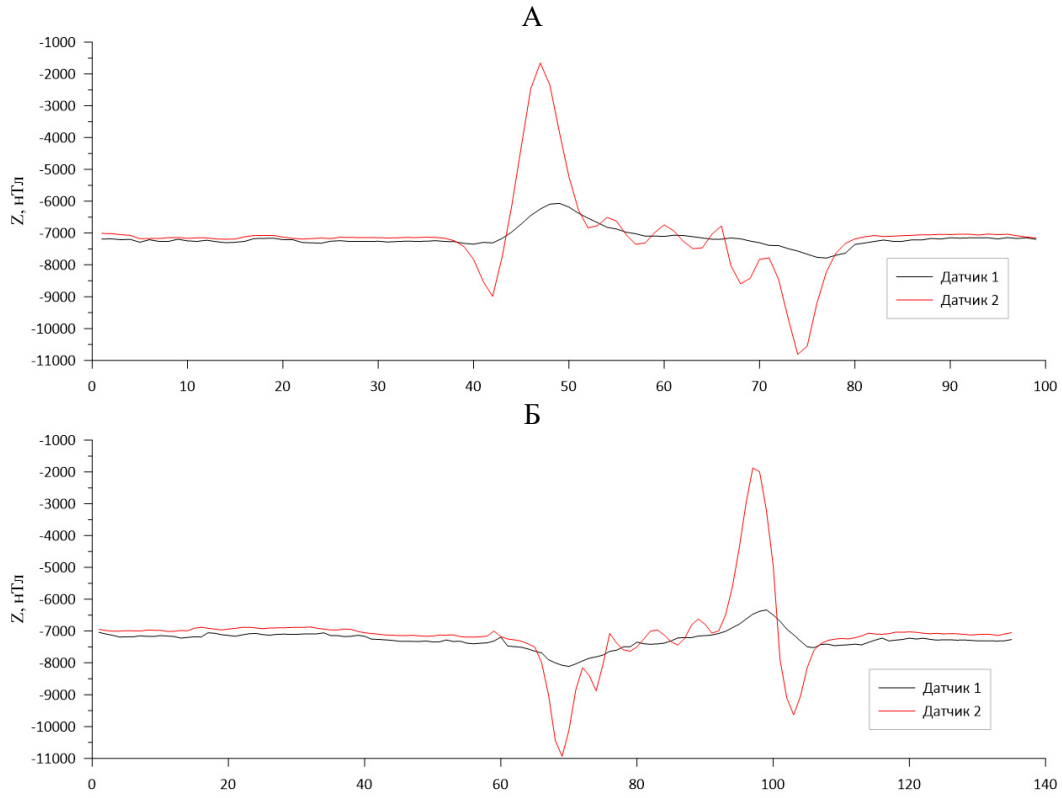


Рис. 5. Измерения вдоль трубопровода в прямом (А) и обратном (Б) направлении по компоненте  $Z$  после сварки

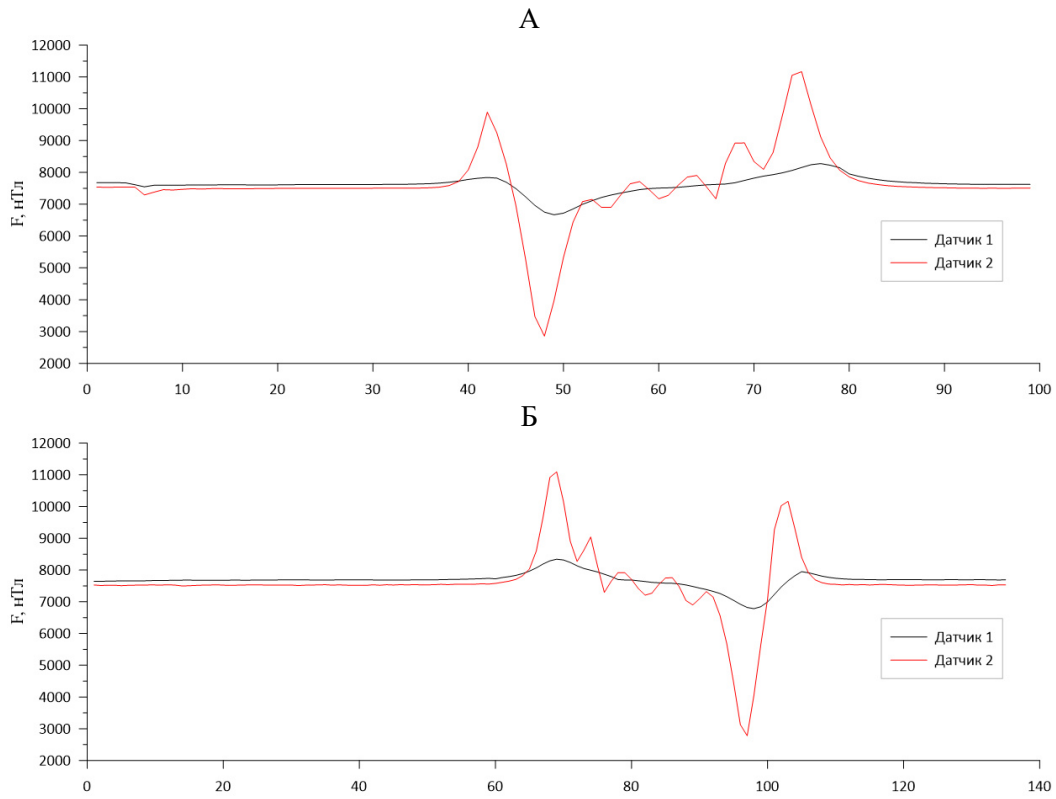


Рис. 6. Измерения вдоль трубопровода в прямом (А) и обратном (Б) направлении по компоненте  $F$  после сварки

Эффект от сварочных швов проявляется в измерениях по всем компонентам поля. На графиках выделяются два наиболее амплитудных экстремума – эффекты от торцевых частей трубы, а также 5 менее амплитудных, но при этом четко локализованных, экстремумов.

Для измерения отклонения на сваренной трубе были нанесены деформации (Рис. 7).



Рис. 7. Деформации трубопровода

Для чистоты эксперимента параметры съемки являются идентичными, что и до деформаций (рис. 8).

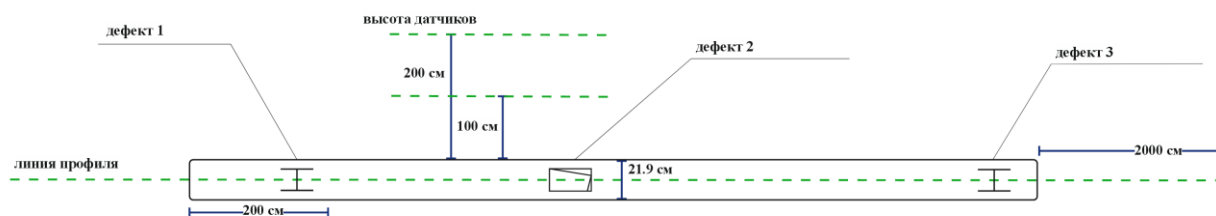


Рис. 8. Схематическое расположение трубопроводов с нанесенным профилем наблюдений (зеленая пунктирная линия)

Дефекты, нарушающие однородность материала, могут приводить к появлению локальных магнитных аномалий.

Локальный дефект стенки трубы приводит к тому, что магнитный поток не может полностью замкнуться внутри стенки, а частично выходит за её пределы. Это создаёт возмущения в распределении магнитного поля вокруг объекта. Эти аномалии можно обнаружить при помощи магнитной дефектоскопии. Результаты измерения магнитного провода над трубой после нанесения деформаций представлены на рисунке 9. Рассмотрим каждую компоненту магнитного поля по отдельности:

1. компонента X – на графике выделяются сварочные стыки. После нанесения дефектов поле стало менее амплитудным, произошло смещение экстремумов аномалий;
2. компонента Y – каждый сегмент трубы в отдельности представляет собой магнитные диполи, которые при сварке проявляются суммарным эффектом, представленным на

графике. После нанесения дефектов у некоторых аномалий поменялся знак, изменилась амплитуда и сместился экстремум.

- компонента Z и полный вектор F – на вертикальной компоненте и на полном векторе индукции труба представляется единым магнитным диполем, имеющим положительный и отрицательный полюса. Схожая картина наблюдается на графике поля после нанесения дефектов. Экстремумы становятся менее амплитудными

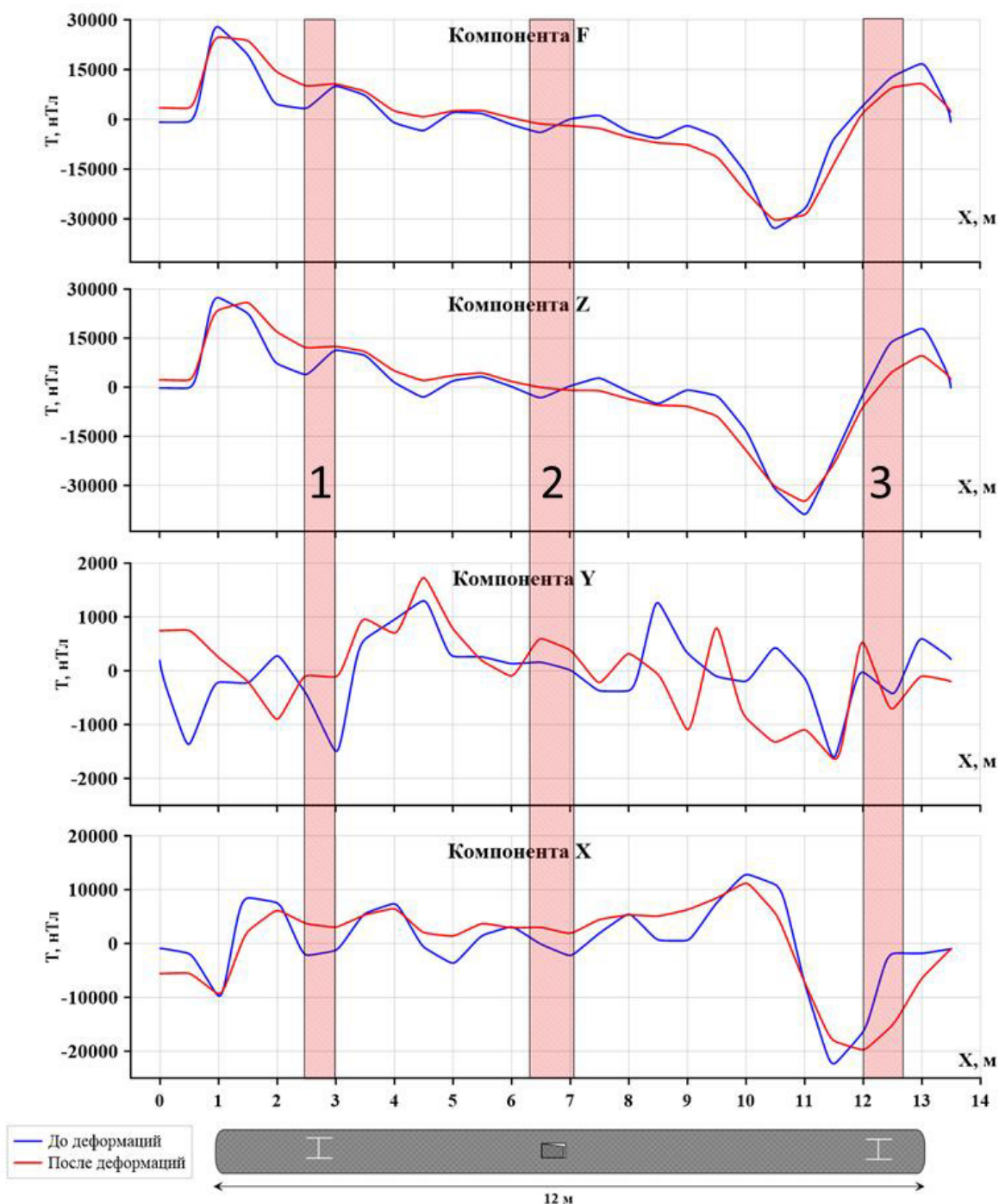


Рис. 9. Результат съемки над трубой до и после деформаций

Магнитное поле поврежденной трубы значительно отличается от исходного поля. Эффект проявляется повышением значений, сглаживанием аномалий от стыковочных швов и изменением формы аномалий (рис. 9). Более подробная информация по каждому дефекту приведена в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение магнитного поля до и после деформации

№ дефекта/ компонента	1		2		3	
	до	после	до	после	до	после
X	локальный минимум, эффекты от стыковочных швов	повышение значений поля на 6000 нТл, сглаживание локального минимума	локальный минимум, эффекты от стыковочных швов	повышение значений поля на 4000 нТл, сглаживание локального минимума	локальный минимум, эффекты от стыковочных швов	смещение экстремума в сторону дефекта, изменение его амплитуды на 4000 нТл
Y	локальный минимум, эффекты от стыковочных швов	повышение значений поля на 1500 нТл, сглаживание локального минимума	отсутствие локальных аномалий	границы дефекта проявлены локальными минимумами, повышение значений на 500 нТл	локальный минимум, эффекты от стыковочных швов	смещение экстремумов, увеличение их амплитуды на 1000 нТл
Z	эффекты от стыковочных швов	повышение значений поля на 8000 нТл, сглаживание локальных минимумов	эффекты от стыковочных швов	сглаживание локального минимума, эффект от стыковочного шва не проявляется	эффекты от стыковочных швов	смещение экстремума в сторону дефекта, сглаживание эффектов от стыковочных швов
F	эффекты от стыковочных швов	повышение значений поля на 7000 нТл, сглаживание локальных минимумов	эффекты от стыковочных швов	сглаживание локального минимума, эффект от стыковочного шва не проявляется	эффекты от стыковочных швов	смещение экстремума в сторону дефекта, сглаживание эффектов от стыковочных швов

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По полученным результатам была определена возможность применения магниторазведки для выполнения бесконтактной дефектоскопии трубопровода в доаварийный период с использованием феррозондового трехкомпонентного магнитометра-градиентометра.

Выполненный эксперимент показал высокий уровень применимости, дефекты целостности трубопроводов значительным образом влияют на уровень создаваемого магнитного поля. В том числе проявляются такие дефекты, как: стыковочные (сварочные) швы, надрезы, срывы.

Таким образом, измерение магнитного поля над магистральными трубопроводами позволяет обнаружить различного рода повреждения.

### ЛИТЕРАТУРА

- Брагина А.А., Арутюнян Д.А., Шклярчук А.Д., Палёнов А.Ю., Паньшин Е.А. Сравнение измерительной информации магнитометрической аппаратуры на геофизической базе МГУ в д. Александровка // Гелиогеофизические исследования: научный электронный журнал. 2023 № 43. С. 26-37.

- Булычев А.А., Горбунов А.А., Золотая Л.А., Лыгин И.В., Модин И.Н., Паленов А.Ю., Муравьев Л.А. Геофизическая разведка неразорвавшихся боеприпасов // Тезисы докладов второй Международной научно-практической конференции «Инженерная геофизика-2006». 2006. С. 175-179.
- Вишняков Д.Д., Арутюнян Д.А., Шклярук А.Д., Брагина А.А., Паньшин Е.А. Сравнение измерительной информации магнитометрической аппаратуры на полевой экспериментальной базе «Электроугли» // Гелиогеофизические исследования: научный электронный журнал. 2023 № 41. С. 11-15.
- Коснырева М.В., Кузнецов К.М., Паленов А.Ю., Золотая Л.А., Лыгин И.В., Арутюнян Д.А. Многоуровневая магнитная съемка с использованием БПЛА для изучения линейных техногенных объектов // EAGE EarthDoc. Engineering and Mining Geophysics. 2020. С. 1 – 11.
- Модин И.Н., Паленов А.Ю., Золотая Л.А., Любомудров А.И. Геофизические поиски мест коррозии на магистральных трубопроводах // Тезисы докладов III Международной научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика - 2007». 2007. С. 194-196.

## EXPERIMENTAL WORK ON PIPELINE INSPECTION USING MAGNETOMETRIC EQUIPMENT

Arutyunyan D.A., Shklyaruk A.D., Bragina A.A., Palenov A.Yu., Anikina E.D., Medvedev P.D.  
Linovich V.S., Belov G.S., Kolomin M.V.

The article presents the results of pipeline inspection work obtained through synchronous measurements of the magnetic field at the geophysical base of Moscow State University in the village of Aleksandrovka, Kaluga region. An experimental prototype of a magnetometer-gradiometer developed by the Federal State Budgetary Institution "IPG" was used as the testing equipment. The article includes informative graphs of the measurement data and provides an analysis of the features of the obtained results.

**KEYWORDS:** MAGNETOMETRIC EQUIPMENT, GEOMAGNETIC ACTIVITY, EARTH'S MAGNETIC FIELD (EMF), MAGNETOSPHERE, MAGNETIC FIELD VARIATIONS, GEOMAGNETIC DISTURBANCES