

КОРРЕКЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ КОРПУСА ПРИБОРА ОТ ВЕРТИКАЛИ ПРИ ГРАДИЕНТОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА

Ш. Р. АХМЕТОВ¹, В. Х. ЯСОВЕЕВ², Д. Г. МИЛОВЗОРОВ³

¹ alienme@yandex.ru, ² yasov@mail.ru, ³ dgmilovzorov@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Аннотация. В статье представлена формула расчета положения устройства в пространстве, которая учитывает изменение ориентации более чем на 90 градусов. Приведены результаты практического исследования. Описана методика экспериментального исследования.

Ключевые слова: пространственное положение; градиентометрия; магнитное поле; кватернион; позиционирование.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование магнитных и гравитационных полей является важной задачей в геофизике. Геомагнитное поле создается планетарным динамо, отпечаток магнитного поля сохраняется в остывающих лавовых полях и изучается в ходе палеомагнитных исследований. Благодаря таким отпечаткам, в частности выявлена периодическая смена магнитных полюсов планеты [1]. Локальные аномалии в напряженности магнитного поля могут указывать как на наличие рудных залежей, так и на различные подземные неоднородности, такие как карстовые пустоты, подземные реки и прочее [2]. Очевидно, что выявление подобных аномалий важно и для понимания истории развития планеты [3], и для геологических изысканий при строительстве или разведке месторождений. В большинстве случаев требуется определить именно магнитное поле аномалии, которое может быть слабее геомагнитного фона [4]. Для повышения разрешения при исследованиях в таких случаях интересуют градиент магнитного поля, который позволяет избавиться от постоянной составляющей и выявлять только отклонения. Помимо собственно обнаружения аномалии, часто стоит задача определения особенностей магнитных свойств аномалии [5]. Гравиразведка применяется при изучении формы Земли, поисках месторождений полезных ископаемых (нефти и газа, угля, руды, и других), картирования земной коры и верхней части мантии, выделения глубинных разломов и глобальных тектонических структур [6].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Магнитное поле объекта описывается формулой Био-Савара-Лапласа, при этом, учитывая малое отличие относительных магнитных проницаемостей слоев грунта от относительной магнитной проницаемости воздуха μ , можно считать пространство однородным по его магнитным свойствам. Тогда вектор магнитной индукции $B(r_0)$ в любой точке пространства, задаваемой радиус-вектором r_0 (в том числе и в воздухе над исследуемой областью) может быть вычислен по формуле Био-Савара-Лапласа по известному распределению в объеме векторного поля плотности постоянного тока $j(r)$:

$$B(r_0) = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{[j(r)dV, r_0-r]}{(r_0-r)^3} [1].$$

Измерение компонентов вектора магнитной индукции (B_x , B_y , B_z) позволяет получить более полную информацию. Так значения B_x и B_y позволяют найти скрытый ферромагнитный

объект, значение B_z позволяет определить «мощность» этого объекта [7]. Величина модуля магнитной индукции может быть найдена как:

$$(B_i) = \sqrt{B_{xi}^2 + B_{yi}^2 + B_{zi}^2},$$

где B_{xi}, B_{yi}, B_{zi} – значения компонентов вектора магнитной индукции получаемые с i -го датчика градиентометра. В целях более наглядного представления результатов измерений возможно использование других методов получения скалярного значения в каждой точке. Так в статье [7] предложено использование импедансного отношения:

$$(I_{Bi}) = \sqrt{\frac{B_{xi}^2 + B_{yi}^2}{B_{zi}^2}}.$$

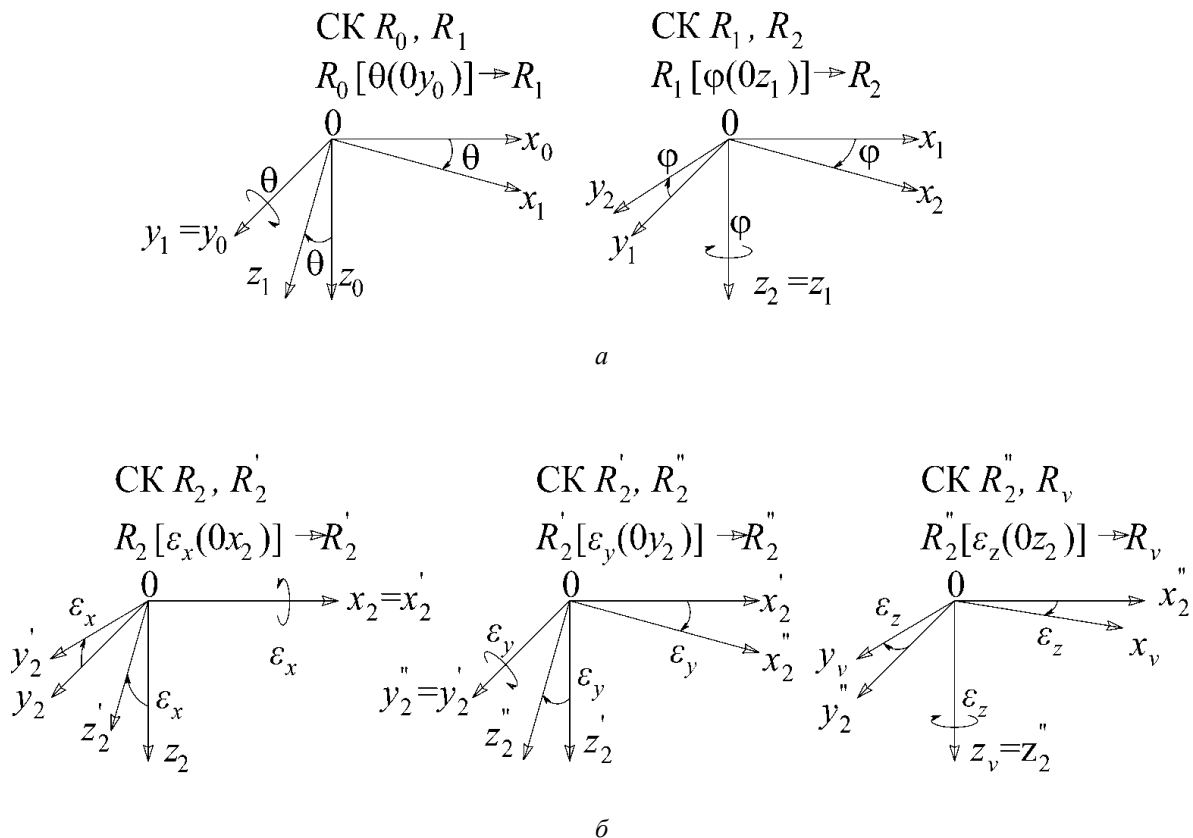


Рис. 1. Преобразование СК трехосевого акселерометрического датчика с вертикальным исходным положением и корпусом круглого сечения

Для получения углов положения прибора в нем установлен акселерометр. Ввиду особенностей конструкции оси X и Y могут поменяться местами (или сместиться на какой либо угол) во время проведения обследования. Так как значения продольной и поперечной компонент магнитного поля используются как сумма их квадратов, поворот вдоль вертикальной оси значения не имеет. Гораздо большее значение имеет компонента B_{zi} . При анализе полей подразумевается, что ось Z направлена по нормали к поверхности Земли. Для уточнения положения корпуса градиентометра используется акселерометр, показания которого позволяют определить положение в пространстве (отклонение от вертикального положения).

В статье [8] основные повороты системы координат градиентометра, связанной с прямоугольной СК Земли, последовательно осуществляются на углы Эйлера-Крылова:

- на угол θ вокруг оси $0y_0$ при переходе от СК R_1 к СК R_2 (рис. 1, а);
- на угол φ вокруг оси $0z_0$ при переходе от СК R_1 к СК R_2 (рис. 1, а);
- на малые углы ε_x , ε_y и ε_z вокруг осей соответственно $0x_v$, $0y_v$ и $0z_v$ при переходе от СК R_2 к СК R_v (рис. 1, б).

Так как градиентометр может использоваться, в числе прочего, с БПЛА, при отсутствии жесткого закрепления с корпусом летательного аппарата, возможны ситуации поворота продольной оси градиентометра (принятой за вертикальную) на угол близкий к 90 градусам (например в результате удара о ветви кустов или деревьев, при сильном ветре и т. п.), использование матричного преобразования с помощью углов Крылова-Эйлера может привести к ошибке «складывания рамок» [9]. Более правильным видится поворот системы координат с помощью кватернионов. Алгоритм вычисления градиента магнитной индукции в этом случае становится следующим:

1. Получаем углы ориентации корпуса в пространстве от акселерометра;
2. Вычисляем кватернион, соответствующий данному углу как:

$$q_w = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$q_x = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos(\beta_x)$$

$$q_y = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos(\beta_y)$$

$$q_z = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos(\beta_z)$$

где α — угол поворота корпуса градиентометра в радианах, β — угол между тремя осями координат X, Y, Z составляющий ось вращения.

3. Умножением полученного значения градиента магнитной индукции на кватернион получаем «нормальное» значение градиента.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведены полевые испытания разработанного градиентометра над магистральным трубопроводом диаметром 325мм с толщиной стенки 10 мм., глубина залегания – около 1,2 м. (диаметр и толщина определялись по фрагменту трубы на участке ее замены, глубина залегания – по фрагменту трубы на открытом участке /переход оврага/). Эксперименты производились на различных высотах перемещения датчиков магнитометрической системы над землей, с различными измерительными базами градиентометра.

Объектом натурных испытаний стал участок продуктопровода, идущего между городами Стерлитамак и Ишимбай вдоль автодороги около деревни Урман-Бишкадак. Его примерное расположение определялось визуально по поверхностному слою почвы и по имеющимся над трассой трубопровода контрольно-измерительным пунктам.

Схема траектории производимых измерений указана на рис. 2. Метками 134 и 135 отмечены номера опор линии электропередач, идущей вдоль автодороги.

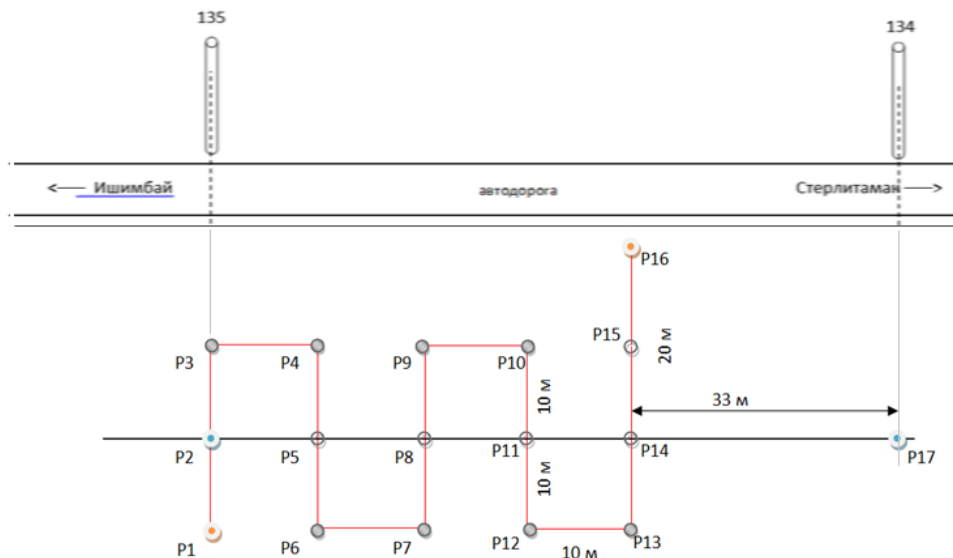


Рис. 2. Траектория трассы трубопровода (черная линия) (вид сверху) и траектория производимых измерений (красная линия)

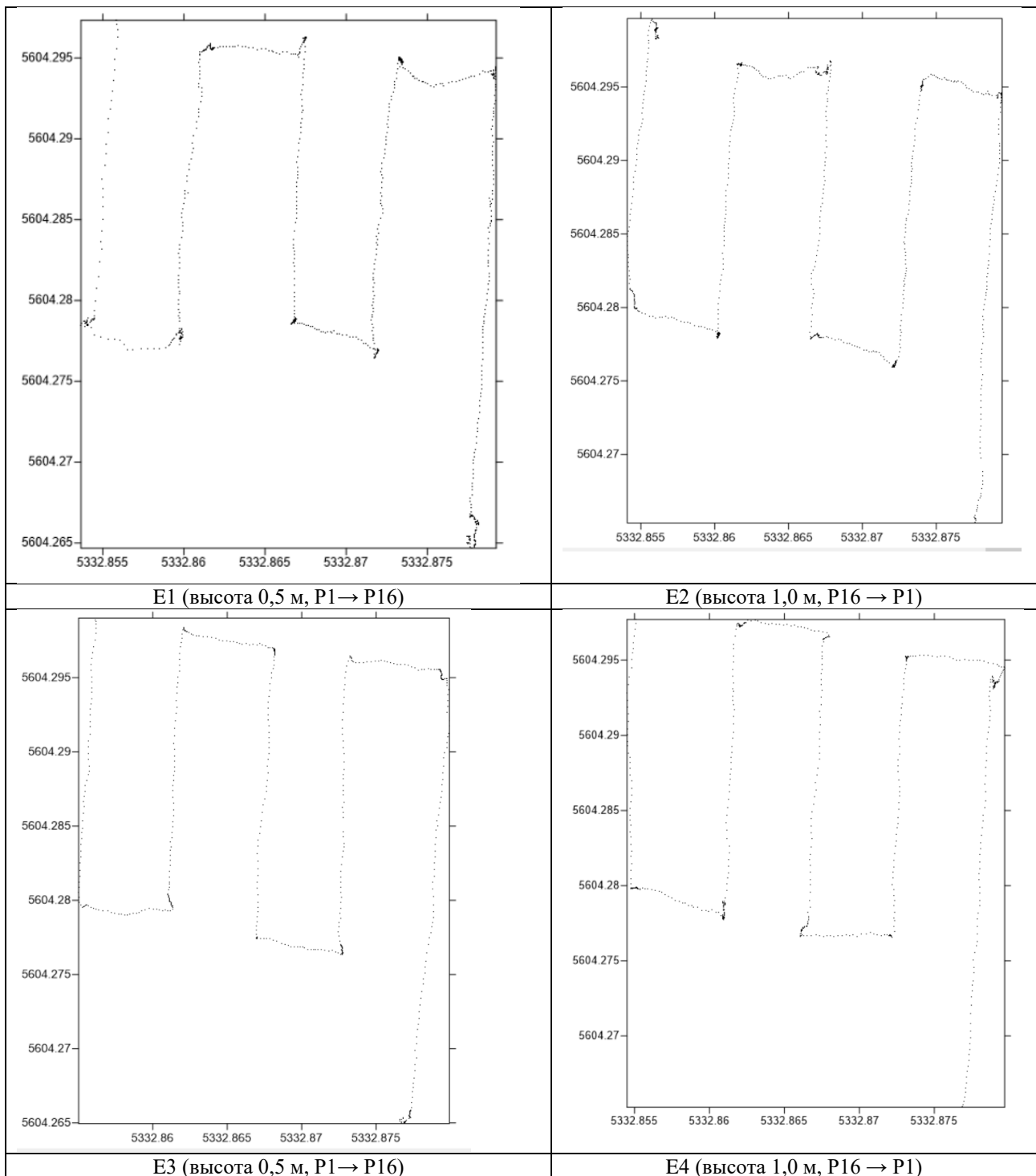


Рис. 3. Траектории (вид сверху) производимых измерений (GPS-координаты)

Произведены несколько экспериментов:

1. Эксперимент E1: ненормированные значения, высота $h = 0,5$ м, в прямом направлении (от точки P1 к точке P16).
 2. Эксперимент E2: ненормированные значения, высота $h = 1,0$ м, в обратном направлении (от точки P16 к точке P1).
 3. Эксперимент E3: выполнено нормирование показаний кватернионами с учетом отклонений от вертикали, высота $h = 0,5$ м, в прямом направлении (от точки P1 к точке P16).
 4. Эксперимент E4: выполнено нормирование показаний кватернионами с учетом отклонений от вертикали, высота $h = 1,0$ м, в обратном направлении (от точки P16 к точке P1).
- (X, Y)-координаты точек наблюдения для экспериментов E1 – E4 показаны на рис. 3.

Приведем графики измеренных компонент магнитного поля для эксперимента ЕЗ (высота 0,5 м, P1→ P16), в том числе на каждом из прямолинейных участков. Измерения компонент магнитного поля, полученные для точек, имеющих одинаковые X- и Y-координаты осреднялись, учет отклонений от вертикали не производился.

На рисунках ниже, после точки пикета Pn (см. рис. 2) в скобках обозначен номер точки измерений. Например, в записи P1(1) – первая точка измерений (первая точка на оси x графика) соответствует пикету P1, в записи P3(51) – 51-я точка измерений (последняя точка на оси x графика) соответствует пикету P3. Синим цветом обозначены графики компонент поля, соответствующие ненормированным значениям градиента, красным цветом – графики компонент поля с нормированием кватернионами.

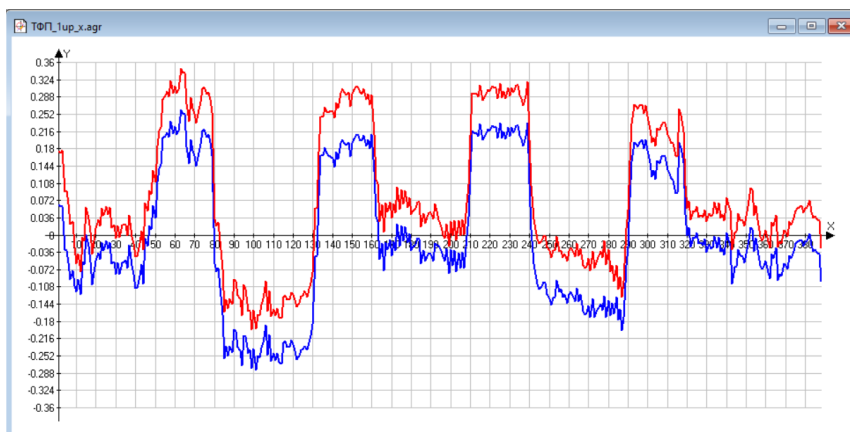


Рис. 4. X-координата вектора магнитной индукции (нТл) на траектории P1(1) -P16(388)

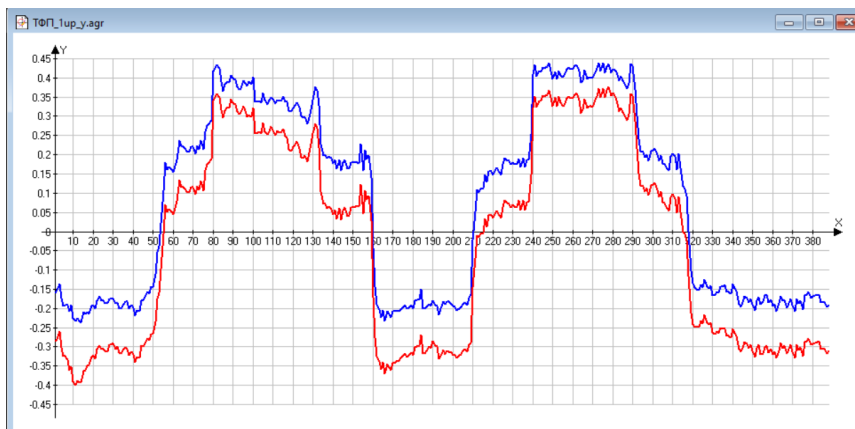


Рис. 5. Y-координата вектора магнитной индукции (нТл) на траектории P1(1) -P16(388)

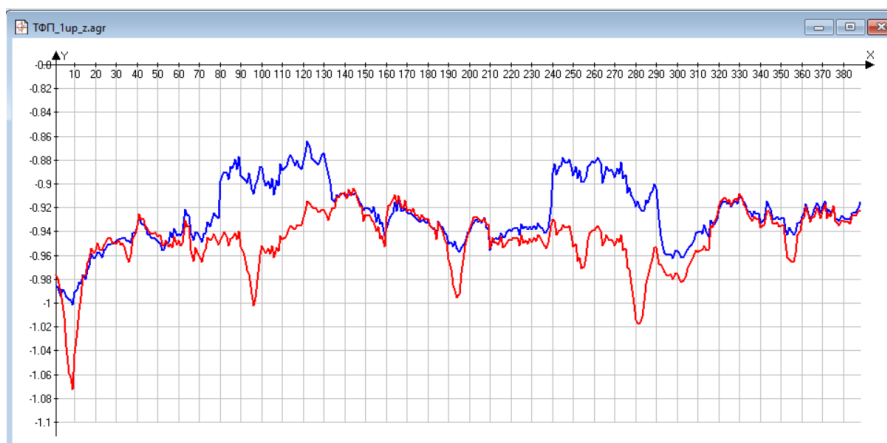


Рис. 6. Z-координата вектора магнитной индукции (нТл) на траектории P1(1) -P16(388)

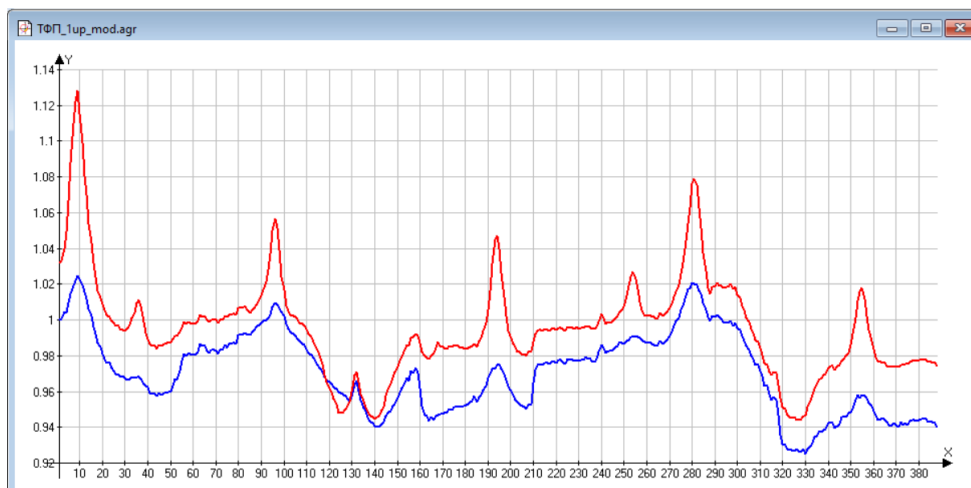


Рис. 7. Модуль вектора магнитной индукции (нТл) на траектории P1(1) -P16(388)

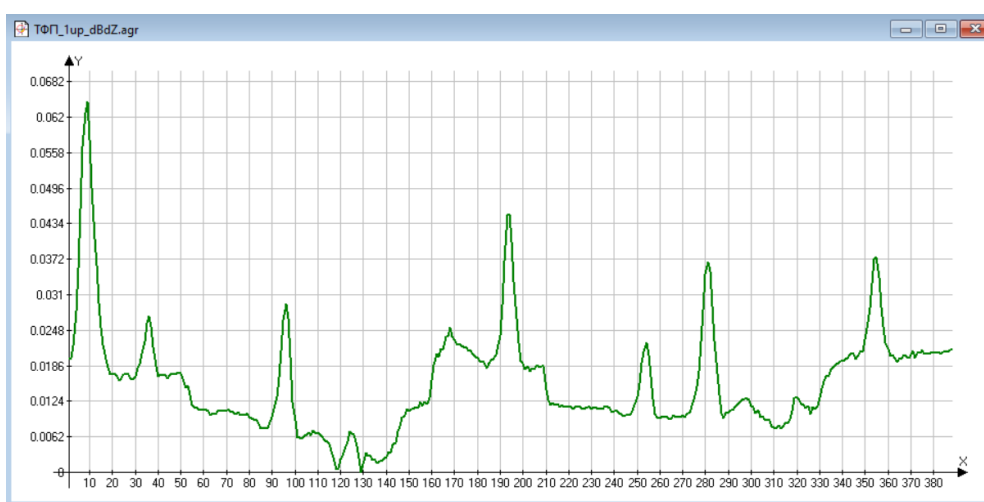


Рис. 8. Градиент по z модуля вектора магнитной индукции (нТл/м) на траектории P1(1) -P16(388)

В приложении Д отображены измеренные величины B_x , B_y , B_z и вычисленные на их основе $\text{mod}(B)$ и $\text{Grad}_z(\text{mod}(B))$ на прямолинейных отрезках траектории, пересекающих трубопровод и расположенных параллельно трубопроводу.

На участках, параллельных трубопроводу (P3-P4, P6-P7, P9-P10, P12-P13), модуль вектора магнитной индукции ведет себя достаточно ровно и всплесков поля не демонстрирует. На участках, ортогональных трубопроводу (P1-P3, P4-P6, P7-P9, P10-P12, P13-P16), на графиках модуля вектора магнитной индукции имеются локальные максимумы, места расположения которых связаны с пересечением трубопроводов.

На рис. 9 ниже демонстрируются графики модуля вектора магнитной индукции (нТл) на площади для эксперимента E3. Красной линией на графиках показана (X,Y)-траектория перемещения датчиков градиентометра.

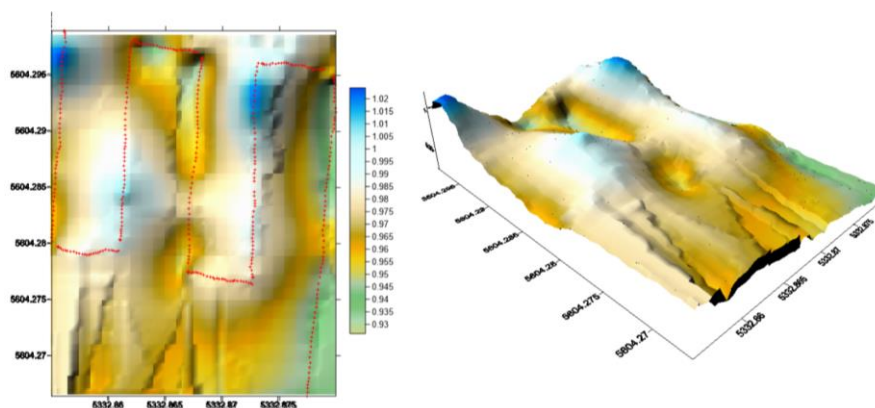


Рис. 9. Поверхности модуля вектора магнитной индукции (нТл) без нормирования

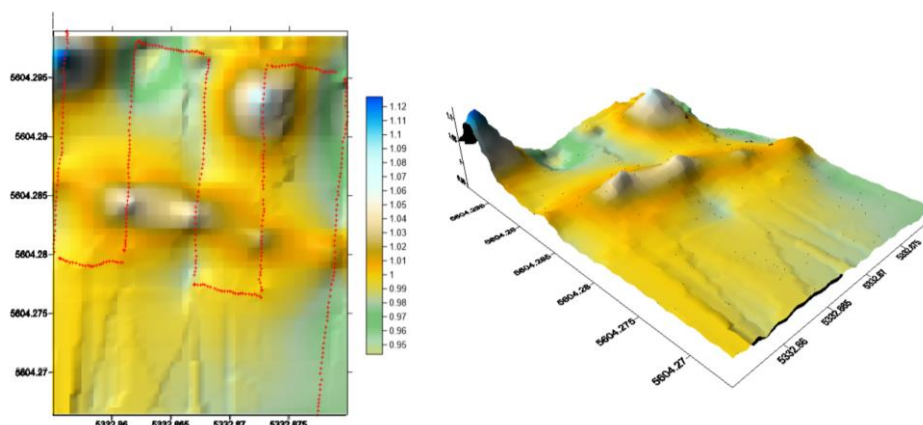


Рис. 10. Поверхности модуля вектора магнитной индукции (нТл) с нормированием

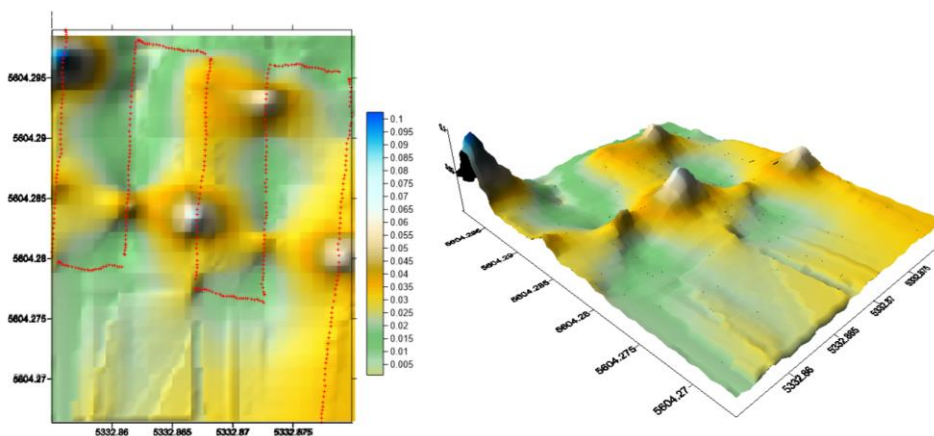


Рис. 11. Градиент по z модуля вектора магнитной индукции (нТл/м) по данным датчиков

На графиках максимумам модуля магнитной индукции и максимумам градиента по z модуля вектора магнитной индукции на траектории движения соответствуют точки, показывающие подземное расположение трассы трубопровода.

Дополнительно было проведено исследование участка поверхности земли, не имевшего объектов искажающих магнитное поле. Результаты приведены на рис. 12. Верхний рисунок построен с учетом приведения полученных значений к нормальным с учетом отклонения градиентометра от вертикальной оси, на нижнем представлены значения без таковой обработки.

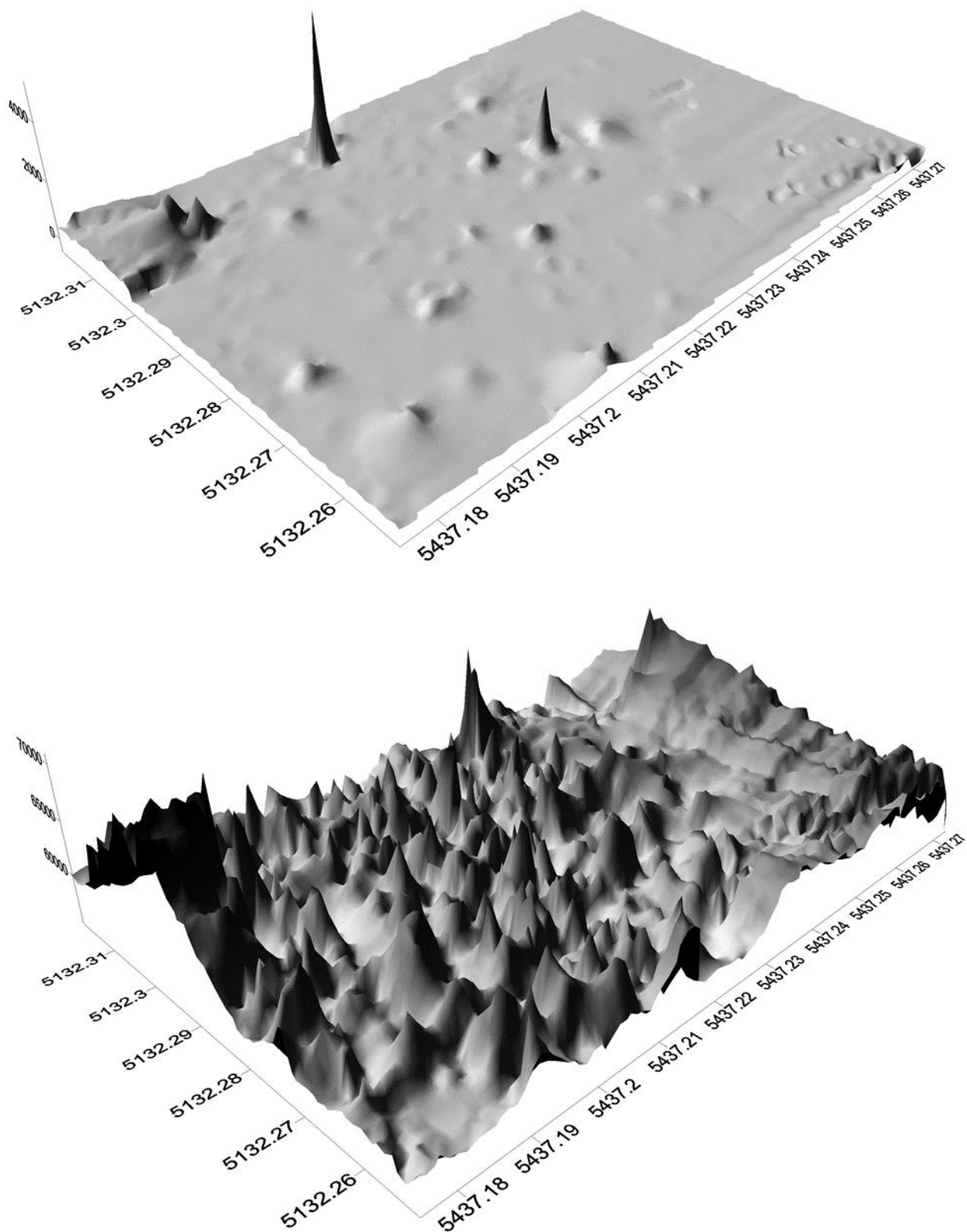


Рис. 12. Модуль вектора магнитной индукции с учетом отклонений от рабочего положения (вверху) и без учета (внизу)

ВЫВОДЫ

Постобработка результатов градиентометрии в части нормирования полученных результатов необходима для более достоверного представления о магнитных полях на исследуемом участке. В случае градиентометрии, при которой прибор гарантировано не будет сильно отклоняться от рабочего положения возможна коррекция отклонений с помощью углов Эйлера-Крылова. Разрабатываемый градиентометр должен иметь возможность его буксировки в том числе и с помощью БПЛА, что не гарантирует стабильность положения прибора, а соответственно требуется корректировка полученных значений для коррекции отклонений от вертикального положения. Так как в процессе полета градиентометр может существенно отклоняться, в том числе и на углы больше 90 градусов, обработка результатов с помощью кватернионов будет более точной, при этом требуемые вычислительные ресурсы не превышают таковых для вычислений углов Эйлера-Крылова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н.М. Левашова, И.В. Голованова, Д.В. Рудько, К.Н. Данукалов, С.В. Рудько, Р.Ю. Сальманова, Н.Д. Сергеева. Период гиперактивности магнитного поля в конце эдиакария: оценка частоты инверсий циклостратиграфическим методом. // Физика Земли. - 2021. - №2. - С. 119-129.
2. А. М. Городницкий, Ю. В. Брусиловский, А. Н. Иваненко, К. В. Попов, Н. А. Шишкина. Природа магнитных аномалий в зонах субдукции // Физика Земли. - 2017, - №5, - С. 185–192
3. А. В. Латышев, Д. О. Кушлевич, В. В. Пономарева, М. М. Певзнер, И. В. Федюкин. Вековые вариации геомагнитного поля последних 4000 лет, записанные в лавах и пирокластике северной группы вулканов Камчатки: новые данные. // Физика Земли. - 2017. - №5. - С. 139–148.
4. Д.Г. Миловзоров, В.Х. Ясовеев. Построение феррозондового магнитометрического канала с компенсацией внешнего магнитного поля. Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации // Материалы II Международной научно-технической конференции. 2019. - Уфа: УГАТУ, 19–20 сентября 2019 года. - С. 304-309.
5. Ю.И. Блох. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. Учебное пособие для студентов университетов и вузов, обучающихся по специальности 080400 «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых». // Сигма3D URL: <http://sigma3d.com/pdf/books/blokh-2009.pdf> (дата обращения: 07.03.2021).
6. Миронов В.С. Курс гравиразведки. — : Недра, 1980. — 543 с.
7. Кризский В.Н., Александров П.Н., Викторов С.В. Моделирование электрических и магнитных полей систем катодной защиты магистральных трубопроводов в электрически анизотропном грунте. // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 47-й сессии Международного научного семинара Д. Г. Успенского - В. Н. Страхова.. - Воронеж: Издательско-полиграфический центр "Научная книга" , 2020. - С. 158-162.
8. Миловзоров Д.Г. Об оценке предельных погрешностей инклинометрических систем с феррозондовыми и акселерометрическими датчиками. // Интеллектуальные системы в производстве. - 2021. - №1 (т.19). - С. 33-40.
9. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. — М.: Наука, 1973. — [Для специалистов в области систем управления движением летательных аппаратов]
10. D. G. Milovzorov, V. Kh. Yasoveev. Mathematical Modeling of Fluxgate Magnetic Gradiometers // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2017, Vol. 53, No. 4, pp. 388–394.

ОБ АВТОРАХ

АХМЕТОВ Шамиль Рамилевич, аспирант 2 курса УГАТУ (Уфа).

ЯСОВЕЕВ Васих Хамматович, доктор технических наук, профессор кафедры электронной инженерии АВИЭТ УГАТУ (Уфа).

МИЛОВЗОРОВ Дмитрий Георгиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электронной инженерии АВИЭТ УГАТУ (Уфа).

METADATA

Title: UAV aided gradient investigations measurement results compencation on device misalignment.

Authors: Sh. R. Akhmetov ¹, V. Kh. Yasoveev ², D. G. Milovzorov ³

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹ alienme@yandex.ru, ² yasov@mail.ru, ³ dgmilovzorov@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (26), pp. 11-20, 2022. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract. Article presents way to calculate spatial position, that takes into account orientation change for more that 90 degrees. Practical investigation results are given. Experimental study methodics are described.

Key words: spatial position; gradiometry; magnetic field; quaternion; alignment.

About authors:

АКХМЕТОВ, Shamil Ramilevich, 2nd year postgraduate student of Ufa State Aviation Technical University.

YASOVEEV, Vasikh Khammatovich, Dr. of Tech. Sci., Prof.б Dept. of Electronic Engineering, AVIET USATU.

MILOVZOROV, Dmitriy Georgievich, Cand. of Tech. Sci., Assoc. Prof., Dept. of Electronic Engineering AVIET USATU.