

УДК 53.087.92

КАРТИРОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ПЛОЩАДИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МАГНИТОНАВИГАЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

А. Н. Тихомиров^{1,2}

¹ Тверской государственной университет
кафедра прикладной физики,
² ООО "Нефтегазгеофизика"

Настоящая работа является частью исследований, направленных на создание нового поколения аппаратуры магнитной навигации для направленного бурения геологоразведочных скважин, а также контроля ориентации различных подвижных платформ и роботизированных устройств. Проведена оценка характера магнитных помех и их суточных изменений в городских условиях с помощью высокоточной аппаратуры квантовой магнитометрии. Получены характеристики рабочих площадок (карты магнитных полей) для проведения юстировочных работ при настройке магнитных навигационных приборов.

Ключевые слова: *магнитная навигация, магнитометрия, слабые магнитные поля*

1. Введение. По мере развития в технике нефтедобычи и геологоразведки бурения скважин со сложным профилем, с большим углом наклона и отходом от вертикали, возрастает важность инклинометрии, призванной обеспечить получение точных данных о положении забоя. Одним из основных условий обеспечения наклонно-направленного бурения является возможность проследить траекторию скважины, получить информацию о текущем положении забоя и спрогнозировать, по какой траектории будет идти бурение дальше. Для решения этих задач используются средства инклинометрии, которые определяют направление скважины и ориентацию бурового инструмента и передают полученные данные на поверхность или сохраняют их в памяти прибора [1, 2].

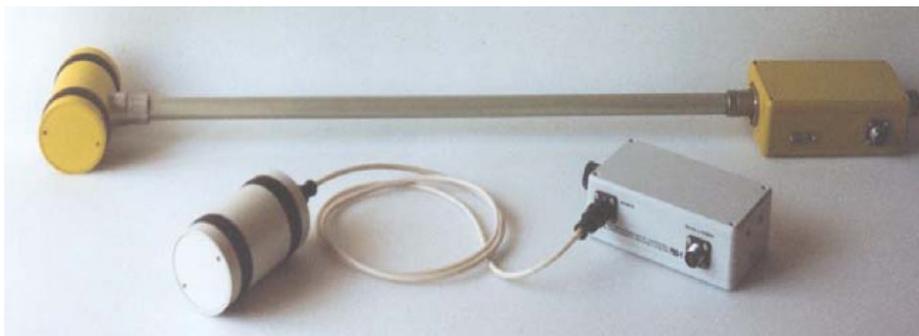
В последние годы в технике инклинометрии всё большее распространение получают магнитные методы направленного бурения. При измерении азимута ствола скважины внутри бурильной колонны магнитными датчиками встает вопрос о правомерности таких замеров, о выборе длины немагнитной бурильной трубы, внутри которой проводятся измерения, и о расположении магнитных датчиков азимута внутри немагнитной бурильной трубы. Для получения информации о направлении, например, об ориентации скважины или бурового инструмента, могут быть использованы магнитные или

гироскопические устройства. В традиционных устройствах прошлых лет использовались механические средства измерения угла, магнитные компасы или гироазимуты и фотокамеры для регистрации показаний приборов. В устройствах нового поколения используются инерционные акселерометры, магнитометры или гиродатчики, электронные приборы с твердотельной памятью или приборы для передачи данных на поверхность.

Работа устройств магнитной навигации основана на измерении компонент вектора магнитного поля Земли, которое может быть подвержено различным изменениям благодаря воздействию различных возмущающих факторов природного и техногенного происхождения. Минимизация и коррекция показаний соответствующей магнитоизмерительной аппаратуры является необходимым условием успешного применения магнитных навигационных методов при направленном бурении. Развитию этих методов способствует значительный прогресс в разработках новых средств магнитных измерений [3–9]. Для магнитной навигации представляют особый интерес высокоточные квантовые магнитометры, основанные на явлениях ядерной прецессии, и новые виды компактных твердотельных электронных компасов на основе малогабаритных магниторезисторных преобразователей.

В настоящей работе ставились задачи освоения современной аппаратуры высокоточной квантовой магнитометрии, оценки её возможностей для решения задач градуировки магнитных навигационных приборов и получения характеристик рабочих площадок (карты магнитных полей) для проведения юстировочных работ при настройке магнитных навигационных приборов на территории городской исследовательской лаборатории.

2. Методика эксперимента. Измерения модуля магнитного поля Земли и его вариаций в зависимости от техногенных факторов проводились с помощью переносного прецизионного магнитометра POS-1 (рис. 1), основанного на принципе динамической поляризации ядер (эффект Оверхаузера) [10]. СКО (среднеквадратичная ошибка измерений) модуля поля по данным производителя при 3-х секундном цикле измерения составляет до 0.01 нТл. Основой датчика служит оверхаузеровский ядерно прецессионный преобразователь на стабильном рабочем веществе, обладающий малым энергопотреблением, высокой чувствительностью [10].



Р и с . 1. Внешний вид магнитометра POS-1

Использование в составе датчика микропроцессора и последовательного порта позволяет обрабатывать и пересчитывать частоту свободной ядерной прецессии непосредственно в значения модуля измеряемого поля, адаптировать обработку сигнала в зависимости от условий измерения, контролировать качество и условия измерения, управлять датчиком по порту с внешнего блока управления, проводить автоматическую внутреннюю настройку датчика, а также «ручную» настройку с внешнего блока управления, выводить результаты измерений и дополнительную информацию в цифровом виде через порт автоматически или по запросу.

Высокие технические и эксплуатационные параметры датчика в комплекте с различными внешними блоками управления обеспечивают возможности его применения в качестве образцового магнитометра слабого магнитного поля (табл. 1).

Датчик допускает режим однократного или автоматического запуска измерений. В режиме автоматического запуска начало измерения синхронизовано с началом секунды по встроенным часам датчика.

Измерения основаны на явлении ларморовской прецессии магнитных моментов во внешнем магнитном поле. Высокоточное определение модуля магнитной индукции возможно благодаря наличию фундаментальной связи между значением поля и периодом свободной прецессии суммарного вектора ядерной намагниченности рабочего вещества вокруг направления вектора измеряемого поля **B**:

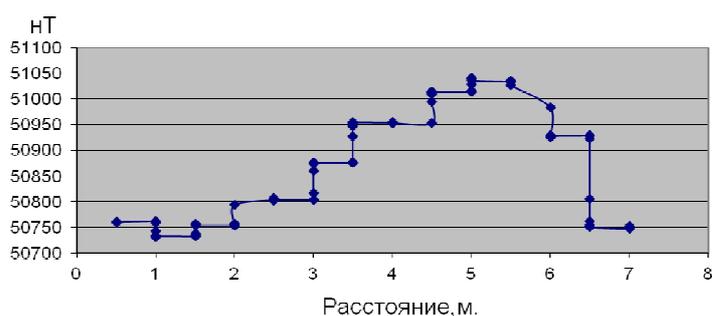
$$|B| = (\gamma T)^{-1}$$

где $\gamma = 0,0425764064$ Гц/нТл – гиромагнитное отношение протона (относительная погрешность определения составляет $1,8 \cdot 10^{-5}$ %) и T – период свободной прецессии.

Т а б л и ц а 1. Метрологические характеристики магнитометра POS-1

Характеристики	Значение
Диапазон измерений модуля магнитной индукции, нТл	20000–100000
Разрешающая способность, нТл	0.001
Основная систематическая погрешность измерения, не более, нТл	1
Модуль среднего квадратичного отклонения случайной составляющей погрешности измерения при длительности измерения не менее 3-х секунд, не более, нТл	0,1
Модуль среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности измерения при длительности измерения не менее 3-х секунд и градиенте модуля поля 10000 нТл/м, не более, нТл	50
Дополнительная погрешность измерения в интервале температур от -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$, не более, нТл	1
Дополнительная погрешность при отклонении первичного преобразователя на угол 45° от оптимальной ориентации, не более, нТл	1

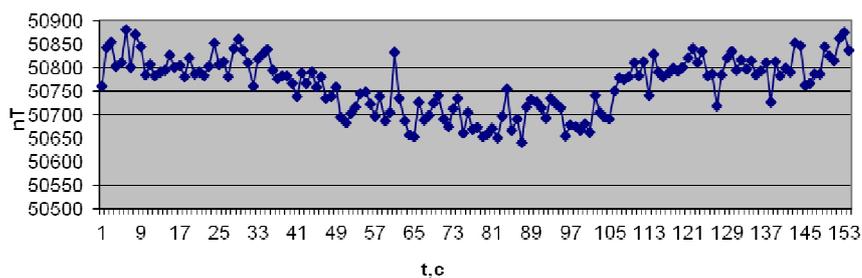
3. Результаты и обсуждение. На рис. 2–3 и в табл. 2–3 представлены результаты замеров вариаций магнитного поля при перемещении магнитометра в уличных городских условиях и при прохождении автомобиля на некотором удалении от места измерений. Из представленных данных видно, что техногенные вариации поля достигают сравнительно больших значений порядка сотен нТ.



Р и с . 2. Вариации магнитного поля при передвижении магнитометра в уличных городских условиях в направлении с запада на восток на расстояние 7 м

Т а б л и ц а 2. Значение поля при передвижении магнитометра

Значение, нТ	Среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности, нТ
50696,5	43,4
50750,5	36,2
50824,0	41,4
50937,9	41,1
50938,3	41,2
51044,6	38,6
51140,5	48,8
51159,1	50,7
50964,7	62,0
50603,9	55,6



Р и с . 3. Изменение модуля магнитного поля при прохождении автомобиля «Газель» на расстоянии 10 м от места измерений

Т а б л и ц а 3. Изменения измеряемого поля под действием проезжающего автомобиля

Исходное значение	50813,4 нТ
При минимальном расстоянии до автомобиля 10 м	50720,4 нТ
Конечное значение	50801,6 нТ

Эффект техногенных воздействий в городских условиях сильно зависит от времени суток. Так, период от полуночи до половины третьего может быть достаточно спокойным (вариации поля не превышают 10...15 нТ), а к утру они возрастают более чем в 10 раз, достигая значений ~ 150...200 нТ (рис. 4).

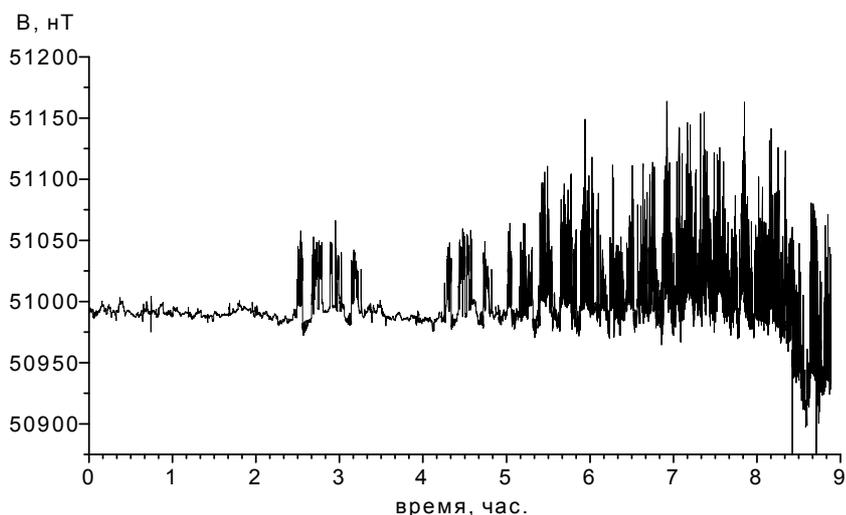


Рис. 4. Вариации модуля магнитного поля в центре рабочей площади в ночное и утреннее время с 0.00 до 9.00 часов

В ходе экспериментов были получены магнитные карты и определены места оптимально подходящие для калибровки навигационных систем на основе феррозондов и магниторезисторов. Для них необходимо создать область с минимальным градиентом магнитного поля. Результаты оценки распределений магнитного поля и карты изолиний на рабочей площади представлены на рис. 5–7.

Измерения проходили в ночное наиболее спокойное время. Магнитометр был закреплён на немагнитной стойке на высоте 1,5 м. Измерения проводились в десяти точках, находящихся на одной прямой, расстояние между точками отсчёта 0,5 м. По этим данным мы можем судить об изменении значения модуля вектора, и об изменении направления вектора магнитного поля Земли. Под влиянием природных и техногенных факторов изменяется модуль вектора магнитного поля земли и направление азимутального угла.

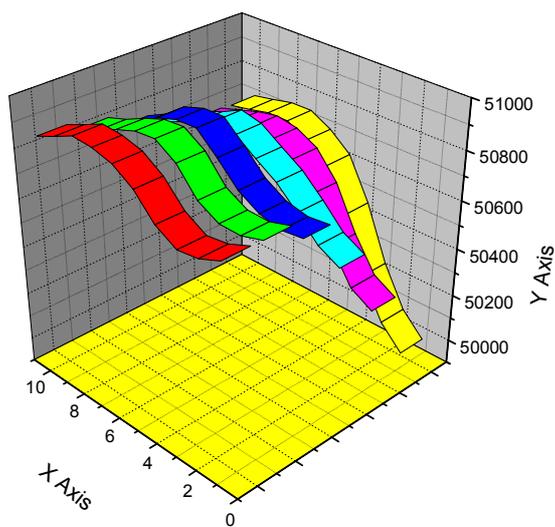


Рис. 5. Распределение магнитного поля на площади 10×8 м на высоте 1 м от поверхности земли

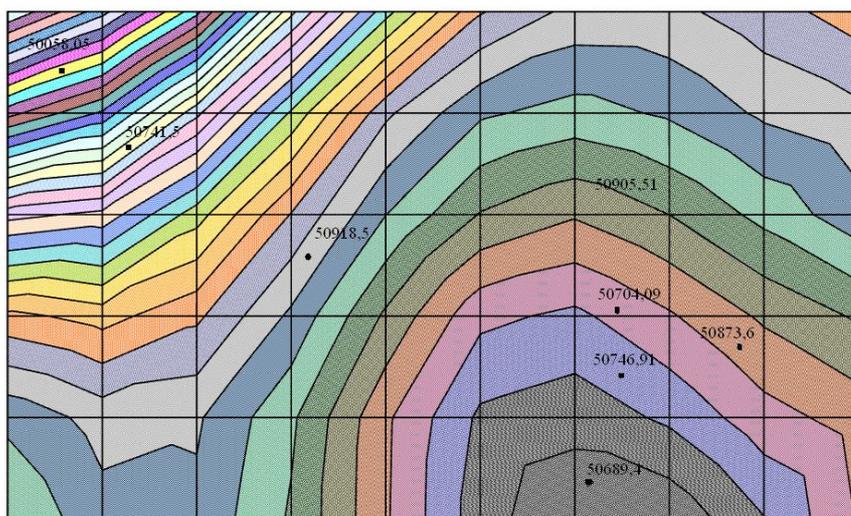
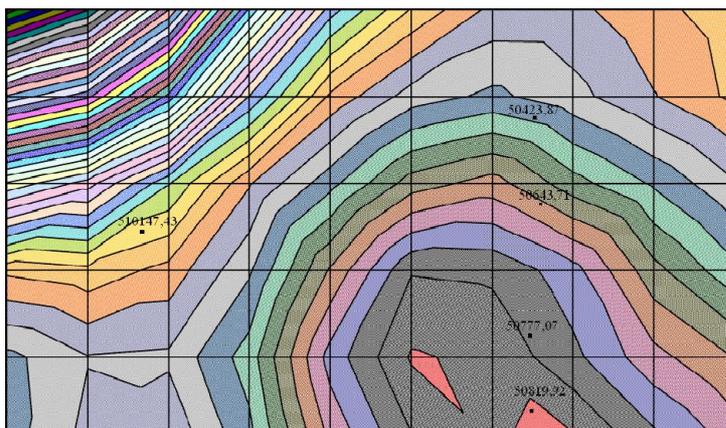


Рис. 6. Карта изолиний магнитных полей на высоте 1 м



Р и с . 7. Карта изолиний магнитных полей на высоте 1 м

4. Заключение. В результате проведенных работ получены экспериментальные данные (карты магнитных полей) рабочих площадок для юстировочных работ при настройке магнитных навигационных приборов. Получены количественные оценки эффектов техногенного характера для городских условий в дневное и ночное время, необходимые для проведения градуировки магнитных преобразователей.

Для целей градуирования и коррекции передаточных характеристик преобразователей целесообразно разделять возмущения земного поля на постоянные (не зависящие от времени) и переменные. Постоянные возмущения определяются наличием как магнитотвёрдых (с ненулевой остаточной намагниченностью), так и магнитомягких предметов и деталей в рабочей зоне и в принципе могут быть скомпенсированы. Компенсация зависящих от времени внешних полей представляет несравнимо более сложную задачу, решение которой возможно лишь в некоторых частных случаях.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры для инновационной России» на 2009–2013 годы и с использованием оборудования Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

Список литературы

1. Исаченко В. Х. Инклинометрия скважин. М.: Недра, 1987.
2. Малюга А.Г., Есауленко В.Н., Афонин Л.А. Технические средства контроля пространственных характеристик скважин. Приборы, средства автоматизации и системы управления. ТС-5. Обзорная информация. Сер. «Электроизмерительные приборы, геофизические и гидрометеорологические приборы». М., ЦНИИТЭИ приборостроения, 1986, вып. 1.

3. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хореев В.Н., Чечурина Е.Н., Щелкина А.П. Средства измерений параметров магнитного поля. Л.: Энергия, 1979.
4. Афанасьев Ю.В. Феррозонды. Л., «Энергия», 1969.
5. Афанасьев Ю.В., Бондаренко С.И., Козлов А.Н., Пак В.П., Шеремет В.И. Магнитоизмерительные приборы для геофизических и других исследований // Метрология. 1989. № 10. С. 3–16.
6. Смирнов Б.М. Метод измерения параметров магнитного поля с подвижной платформы // Измерит. техника. 1992. № 5. С. 55–57.
7. Merauo J.M.G., Brauer P., Primdahl F., Petersen J.R. and Nielsen O.V. Scalar calibration of vector magnetometers // Meas. Sci. Technol. 2000. V. 11. P. 120–132.
8. Thometz T. G. Determining Non-Magnetic Survey Collar Requirements // World Oil. 1976. V. 182, No. 6. P. 79–80.
9. Метрологические основы магнитных наблюдений Сибири и Дальнего Востока. Сборник докладов школы-семинара, с. Паратунка Камчатской обл., 11–16 авг. 2003 г. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2003. 103 с.
10. Сапунов В.А. Лаборатория квантовой магнитометрии. <http://magnetometer.ur.ru>.

MAPPING OF THE WORKING AREA FOR MAGNETIC NAVIGATION SENSOR TESTING

A. N. Tikhomirov^{1,2}

¹ Tver State University
Chair of Applied Physics

² LLC "Tverneftegazgeofizika"

The presented work is a part of the studies aimed at the development of magnetic navigation instruments of next generation for oriented drilling of geological exploration oil wells and orientation control of various moving platforms and robotic devices. The parameters of the magnetic disturbances and their time variation in urban environment are characterized with the aid of high-precision quantum magnetometer. The characteristics of working area (magnetic field maps) for magnetic navigation instruments tuning are obtained.

Keywords: *magnetic navigation, magnetometry, weak magnetic fields*

Об авторах:

ТИХОМИРОВ Алексей Николаевич – аспирант кафедры прикладной физики, 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33, *e-mail:* tikhomirov.40@mail.ru.