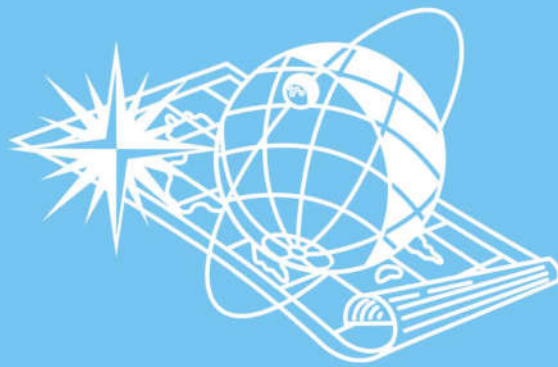


ISSN 2220-0983

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАВИГАЦИОННО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

№ 4 (73)
Декабрь 2023

НАВИГАЦИЯ И ГИДРОГРАФИЯ



Санкт-Петербург

сведений, составляющих государственную тайну, и служебной тайны в области обороны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон от 08.12.2003 № 164-ФЗ «Об основах государственного регулирования внешнеторговой деятельности» (с изменениями и дополнениями).
2. Федеральный закон от 18.07.1999 № 183-ФЗ «Об экспортном контроле» (с изменениями и дополнениями).
3. Указ Президента Российской Федерации от 05.05.2004 № 580 «Об утверждении Списка товаров и технологий двойного назначения, которые могут быть использованы при создании вооружений и военной техники и в отношении которых осуществляется экспортный контроль», (с изменениями и дополнениями).
4. Постановление Правительства Российской Федерации от 02.08.1997 № 973 «Об утверждении Положения о подготовке к передаче сведений, составляющих государственную тайну, другим государствам или международным организациям» (с изменениями и дополнениями).

LEGAL DESCRIPTION OF THE SITUATION OF TRANSFER OF MARINE RESEARCH REPORTS TO FOREIGN COMPANIES

N. S. Sokolov (“GNINGI” JSC)

The article reveals legal peculiarities of transfer of marine research materials to foreign companies.

УДК 550.380

**ГОДОГРАФ И ИЗМЕРЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ
ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФЕРРОМАГНИТНОМ СУДНЕ**

С. А. ИВАНОВ (СПбФ ИЗМИРАН),
С. А. МЕРКУРЬЕВ (СПбФ ИЗМИРАН, СПбГУ),
И. М. ДЕМИНА (СПбФ ИЗМИРАН)

Изучается годограф – кривая (Y, X) , где X и Y горизонтальные компоненты магнитного поля Земли, измеренные в корабельной системе координат при циркуляции корабля. Приведены примеры применения годографа к данным, полученным в экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский» 2019–2020 гг.

1. Введение

Задача измерения магнитного поля Земли (МПЗ) на движущемся ферромагнитном судне всегда интересовала исследователей. В навигации, несмотря на появление спутниковых систем, использование геомагнитного поля привлекает, в частности, своей полной автономностью. Главным препятствием на этом пути является собственное поле корабля, сравнимое по величине с магнитным полем Земли. Магнитное поле корабля трудно поддаётся определению, поскольку зависит от конфигурации мягкого и твёрдого железа в конструкции корабля, внешнего поля и

постоянного изменения ориентации осей измерительной системы, связанной с движением судна (рысканье, бортовая и килевая качки).

Из работ, описывающих применения трехкомпонентных магнитометров для нахождения компонент поля, укажем на [1–4]. В публикациях [1, 2] определение компонент поля проводилось при разумных для высоких широт упрощениях, в частности, в предположении, что вертикальная компонента значительно превосходит горизонтальную. В работе [3] предложен метод применения компонентных магнитометров для анализа линейных магнитных аномалий в зоне разлома Мендосино (сегмент Срединно-Атлантического хребта). В статье [4] в отсутствии информации о МПЗ решалась задача определения склонения и наклона по измерениям трехкомпонентного магнитометра в различных положениях относительно горизонтальной плоскости и плоскости магнитного меридиана. Такого рода работы обычно проводятся для калибровки компонентных магнитометров. Этой важной теме посвящено большое число публикаций, см., например, [5–12]. Основной принцип калибровки состоит в регистрации магнитного поля при поворотах измерительной системы, как в горизонтальной плоскости, так и в плоскости магнитного меридиана с последующей минимизацией погрешности. При этом внешнее магнитное поле считается известным. Так, в работе [12] дан подробный алгоритм определения параметров возникающего эллипсоида – трехмерного аналога годографа (см. также [13]). Главное условие – внешнее магнитное поле известно и не меняется в области измерений. Наиболее просто выполнение этих условий обеспечивается проведением таких работ в магнитных обсерваториях.

В данной статье изучается возможность извлечения информации о магнитном поле Земли из измерений компонент на ферромагнитном носителе в случае, когда неизвестны ни параметры магнитного поля Земли, ни поле судна. Приведён пример обработки компонентных данных, полученных в ходе кругосветной экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский» 2019–2020 гг. [14].

2. Магнитное поле судна и годограф

2.1. Постановка задачи

Пусть измерения компонент геомагнитного поля осуществляются на ферромагнитном носителе во время выполнения кораблем циркуляции. Предполагается, что напряженность магнитного поля постоянна в зоне движения магнитометра во всех направлениях. Такого рода работы проводятся в ходе рейса регулярно для определения девиационной поправки [15] и калибровки датчиков. В качестве исходных данных будем использовать горизонтальные компоненты, измеренные в корабельной системе координат. В качестве основного инструмента изучения магнитного поля по результатам таких измерений в данной работе предлагается годограф – кривая (Y, X) .

2.2. Магнитные поля в корабельной системе координат

Рассмотрим две системы координат, изображенные на рис.1:

а) топографическая прямоугольная система координат (x, y, z) : начало системы координат в точке наблюдения, плоскость xu является касательной плоскостью к земному эллипсоиду, причем ось x ориентирована на север, а ось y – на восток. Ось z совпадает с местной вертикалью и направлена вниз;

б) судовая (корабельная) система координат (x_s, y_s, z_s) : образуется диаметральной плоскостью, плоскостью шпангоута и плоскостью теоретической палубы с центром в

точке наблюдения, ось x_s лежит в плоскости теоретической палубы и направлена в сторону носа корабля, ось y_s – в плоскости шпангоута и направлена в сторону правого борта, ось z_s – направлена вниз. Считаем, что вертикаль прибора совпадает с осью oz в топографической системе координат, т. е. в измеренные значения внесены поправки за качку. Также полагаем, что прибор калиброван.

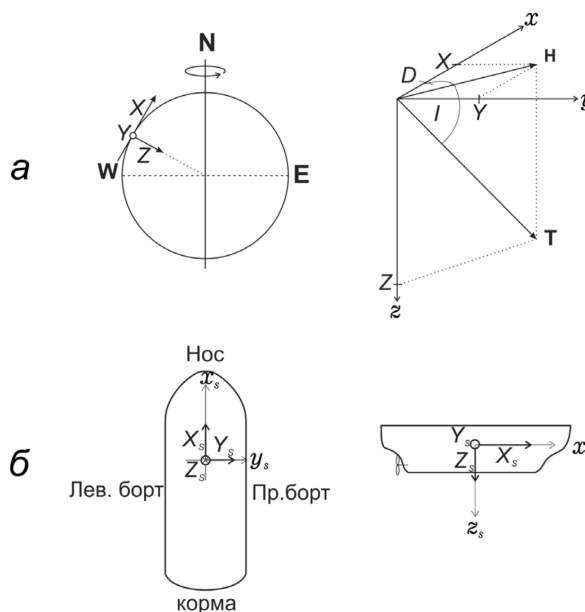


Рис 1. Компоненты вектора магнитной индукции \mathbf{T} : a – X, Y, Z – компоненты, D и I – углы склонения и наклонения вектора геомагнитного поля в топографической системе координат, H – горизонтальная компонента; b – X_s, Y_s и Z_s – компоненты вектора геомагнитного поля в корабельной системе координат

Внешнее поле в топографической системе координат:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H \\ Z \end{pmatrix}.$$

Магнитное поле в корабельной системе координат складывается из трех компонент:

1. Внешнее поле в судовой системе координат:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_s \\ Z_s \end{pmatrix}.$$

2. Часть поля судна, вызванная остаточной намагниченностью (жесткое железо):

$$\mathbf{T}_h = \begin{pmatrix} P \\ Q \\ R \end{pmatrix}.$$

3. Поле, вызванное наведенной намагниченностью (мягкое железо), которое линейно связано с внешним полем через матрицу Пуассона \mathcal{P} :

$$\mathbf{T}_s = \mathcal{P}\mathbf{T} = \begin{pmatrix} aX_s + bY_s + cZ_s \\ dX_s + eY_s + fZ_s \\ gX_s + hY_s + kZ_s \end{pmatrix}.$$

Тогда в корабельной системе координат выражение для поля принимает вид:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} aX_s + bY_s + cZ_s \\ dX_s + eY_s + fZ_s \\ gX_s + hY_s + kZ_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P \\ Q \\ R \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Для горизонтальной проекции после группировки имеем:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_s + aX_s + bY_s \\ Y_s + dX_s + eY_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} cZ_s \\ fZ_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P \\ Q \end{pmatrix}.$$

Поскольку наведенная индукция направлена против внешнего поля, то $a < 0$ и $e < 0$ [16]. При симметрии корабля и расположении магнитометра в плоскости шпангоута и в диаметральной плоскости недиагональные коэффициенты равны нулю $b=0$ и $d=0$ [17–19]. В общей ситуации они могут иметь любой знак. К сожалению, по техническим обстоятельствам, магнитометры на борту ОИС «Адмирал Владимирский» не удалось установить строго в диаметральной плоскости, что осложнило наблюдения, и в результате последние коэффициенты не были нулевыми, но были, по-видимому, малы.

2.3. Годограф

Пусть судно движется некоторым курсом (курсовым углом) k и магнитным курсовым углом α (угол между направлением движения судна и горизонтальной компонентой \mathbf{H} , отсчитываемый от магнитного севера по часовой стрелке). Т. е. $k = \alpha + D$, где D – неизвестное склонение. Будем считать, что ось корабля совпадает с направлением движения. Тогда в корабельной системе координат горизонтальные компоненты внешнего поля равны:

$$\begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H \cos \alpha \\ -H \sin \alpha \end{pmatrix}.$$

Следовательно, измеренные значения равны:

$$\begin{aligned} X' &= (1 + a)H \cos \alpha + bH \sin \alpha + cZ + P \\ Y' &= dH \cos \alpha - (1 + e)H \sin \alpha + fZ + Q \end{aligned} \quad \text{и } \mathbf{H}' = \begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix}. \quad (2)$$

По определению, годограф образован векторами горизонтальной компоненты поля \mathbf{H}' при изменении курса корабля от 0 до 360° . Из выражения (2) видно, что величины $H \cos \alpha$ и $H \sin \alpha$ есть решение системы двух уравнений и линейно выражаются через правую часть этой системы, т. е. через $X' - cZ - P$ и $Y' - fZ - Q$ с коэффициентами, не зависящими от курса. Тогда

$$H'^2 = H'^2 \cos^2 \alpha + H'^2 \sin^2 \alpha = \text{const}$$

есть квадратичная функция измерений X' и Y' , т. е. кривая второго порядка. В силу периодичности эта кривая замкнута и, таким образом, является эллипсом. Заметим, что нахождение эллипса возможно, конечно, не только при полной циркуляции, но и при маршруте, включающем несколько курсов. Формально для этого требуются значения измерений (Y' , X') на пяти курсах. Действительно, эллипс полностью описывается заданием центра, величины осей, и угла между большой осью и фиксированной осью координат.

2.4. Годограф, матрица Пуассона, и SVD-разложение

Согласно выражению (2) центр годографа определяется полем жесткого железа и не зависящей от курса компонентой Z . При выполнении циркуляции их сумма остается постоянной, поэтому положение центра не может быть использовано для определения коэффициентов матрицы Пуассона. На этом основании везде далее мы рассматриваем центрированный эллипс.

После удаления постоянной составляющей измерения, связанные с компонентами внешнего поля, можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} X'' &= (1 + a)H \cos \alpha + bH \sin \alpha \\ Y'' &= dH \cos \alpha - (1 + e)H \sin \alpha \end{aligned}$$

Определим матрицу \mathbf{W} , включающую в себя часть матрицы Пуассона, как

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} 1 + a & b \\ d & -(1 + e) \end{pmatrix}.$$

Тогда можем записать:

$$\begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \end{pmatrix} = \mathbf{W} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}.$$

Знание годографа не определяет матрицу \mathbf{W} . Это естественно, – так \mathbf{W} задается четырьмя параметрами, а центрированный эллипс – тремя.

Найдем, какие характеристики \mathbf{W} можно извлечь из годографа. Матрица \mathbf{W} имеет сингулярное разложение:

$$\mathbf{W} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^*,$$

где \mathbf{U} унитарная вещественная матрица, составленная из собственных векторов $\mathbf{W}\mathbf{W}^*$, $\mathbf{\Sigma}$ – диагональная матрица из сингулярных чисел матрицы \mathbf{W} , \mathbf{V} – унитарная вещественная матрица, составленная из собственных векторов $\mathbf{W}^*\mathbf{W}$. Матрица \mathbf{W} положительно определена ввиду малости недиагональных элементов, и тогда унитарные матрицы \mathbf{U} и \mathbf{V} можно считать матрицами поворота на углы γ и β соответственно. Таким образом, \mathbf{W} можно представить как

$$\mathbf{W} = \mathbf{M}_\gamma \mathbf{\Sigma} \mathbf{M}_{-\beta} . \quad (3)$$

Здесь использовано обозначение M_φ для матрицы поворота на угол φ против часовой стрелки:

$$M_\varphi = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}.$$

Пусть корабль совершает циркуляцию. Тогда горизонтальная компонента – множество пар (Y, X) , пробегает окружность радиуса H в корабельной системе координат. При этом измеренные X'' и Y'' связаны с Y и X преобразованием (3). Применим его к окружности радиуса H . В соответствии с (3) оно разбивается на три преобразования.

1. Поворот M_β . Круг при этом преобразовании не меняется.

2. Умножение на диагональную матрицу $\Sigma = \text{diag}[s_1, s_2]$. Это преобразование превращает круг в эллипс с осями, параллельными координатным осям и равными $s_1 H$ и $s_2 H$.

3. Поворот эллипса на угол γ матрицей M_γ .

Таким образом, после исключения постоянной составляющей поля для восстановления Y и X по X'' и Y'' необходимо знание двух углов и s_1 и s_2 . Из используемых в этих преобразованиях параметров мы наблюдаем лишь угол γ (угол между осями эллипса и осями координат) и полуоси $s_1 H$ и $s_2 H$ [20]. В этом случае для точного решения задачи необходимо выполнение условия $\beta=0$. Отметим, что в задаче калибровки, т. е. при известном внешнем поле, определение β вполне возможно и соответственно пересчет наблюдаемых значений компонент в компоненты внешнего поля точен.

Получим критерий равенства $\beta=0$ и условия, когда оси эллипса параллельны осям координат, т. е. когда $\gamma=0$.

В соответствии с выражением (3)

$$WW^* = M_\gamma \Sigma^2 M_\gamma.$$

Очевидно, что $\gamma=0$ в том и только в том случае, когда матрица WW^* диагональна. Прямое вычисление дает пропорцию $d/(1+e)=b/(1+a)$.

Действуя аналогично с матрицей W^*W , получаем, что $\beta=0$ тогда и только тогда, когда $d/(1+a)=b/(1+e)$.

2.5. *Определение параметров эллипса по корабельным наблюдениям на разных курсах*

Произвольный эллипс описывается пятью параметрами – координатами центра, величиной полуосей и наклоном главной оси (угол с осью x в локальной декартовой системе координат). При отсутствии шума годограф представляет собой эллипс общего вида, то есть линию второго порядка, тогда точки (x, y) годографа удовлетворяют уравнению:

$$f(x, y) = x^2 + a_4 y^2 + 2a_2 xy + 2a_2 x + 2a_1 y + a_0 = 0.$$

Здесь зафиксирован единичный коэффициент у члена x^2 , который не может быть нулем (годограф никак не может быть параболой).

Мы получили задачу минимизации суммы квадратов невязки по всем наблюдениям:

$$F = \sum f^2(x_i, y_i).$$

С помощью МНК она сводится к задаче линейной алгебры, поскольку неизвестные параметры входят в F линейно. По коэффициентам линии второго порядка проверяем, что это эллипс, и через инварианты находим его параметры [11]. Преимущество такого подхода состоит в том, что не требуется полная циркуляция – формально параметры годографа восстанавливаются по пяти точкам. Заметим, что приближению набора точек эллипсом посвящена большая литература (см., например, [21–24]).

2.6. Приближенное определение горизонтальной компоненты в корабельных координатах

Предлагается следующий алгоритм обработки измерений.

1. Для измеренной величины $\mathbf{H}'' = \begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \end{pmatrix}$ методом наименьших квадратов рассчитывается эллипс (годограф).
2. Преобразованием сдвига получаем эллипс с центром в начале координат.
3. Поворачиваем эллипс на угол $-\gamma$.
4. Масштабированием осей переводим эллипс в круг радиуса H .

В последнем пункте мы предполагаем приближенное знание H , например, из глобальных моделей, поскольку мы наблюдаем полуоси s_1H и s_2H , и без знания H (например, при неточной калибровке прибора) определяется лишь величина s_1/s_2 .

В результате получаем значения горизонтальных компонент X_β и Y_β с точностью до поворота на угол β .

$$\begin{aligned} X_\beta &= \cos \beta X + \sin \beta Y \\ Y_\beta &= -\sin \beta X + \cos \beta Y \end{aligned}$$

Таким образом, предлагаемые преобразования не приводят, вообще говоря, к определению вектора горизонтальной компоненты \mathbf{H} . Однако ввиду симметрии судна матрица Пуассона близка к диагональной, и угол β можно считать малым.

3. Циркуляции в кругосветной экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский»

В ходе юбилейной кругосветной экспедиции на ОИС «Адмирал Владимирский» 2019–2020 гг., кроме основной задачи – уточнения положения Южного магнитного полюса, решался целый комплекс геофизических задач, в том числе использование компонентных магнитометров на борту ферромагнитного судна.

3.1. Аппаратура

Измерения магнитного поля осуществлялись с помощью двух разработанных в СПбФ ИЗМИРАН трехкомпонентных магнитометров. Один из них основан на комплексах MVC-2 и GI-MTS-1 (разработка СПбФ ИЗМИРАН) и состоит из трех датчиков торсионного типа [25]. Эти датчики были ориентированы вдоль продольной x_s , поперечной y_s и вертикальной z_s осей носителя, образующих «мобильную» систему координат. Параллельно с этим использовался компонентный магнитометр с датчиками, принцип действия которых основан на магниторезистивном эффекте

[14, 26]. Устройство и принцип действия магниторезистивных сенсоров описаны в статье [27]. Датчик выполнен в сверхминиатюрном 14-выводном корпусе LCC размером 3,5х3,5 мм.

3.1.1. Калибровка

Процесс подготовки компонентных магнитометров перед измерительными исследованиями (экспедицией) предполагает их калибровку в лабораторных условиях по чувствительности и смещению каждого из трех датчиков, неортогональности осей датчиков, а также по температурной и временной зависимости этих факторов [5]. Перед выходом в море была выполнена первоначальная скалярная калибровка обоих магнитометров в обсерватории Воейково путем позиционирования датчиков в различных положениях в земном поле. В режиме калибровки в поле колец Гельмгольца были определены калибровочные коэффициенты, а также амплитудно- и фазочастотная характеристики магнитометров в диапазоне периодов 0,1–500 с.

Аналогичная процедура с этой аппаратурой была проведена сразу после рейса, она показала высокую устойчивость параметров датчиков магнитометров.

3.2. Полученные данные и результаты обработки

Было выполнено 10 циркуляций в различных частях океана [14]. Места циркуляций показаны на рис. 2.

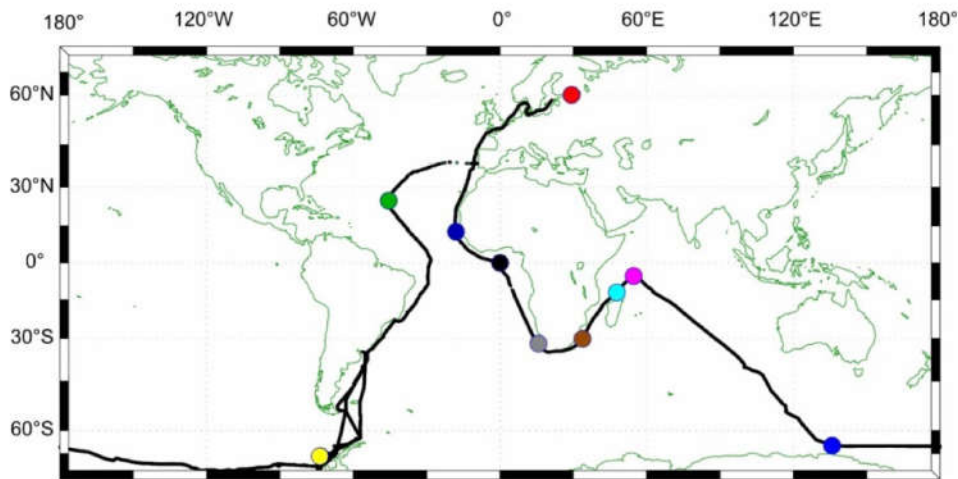


Рис. 2. Места циркуляций, проведенных в ходе экспедиции ОИС «Адмирал Владимирский»

За время кругосветной экспедиции параметры рассчитанных годографов отличались не более чем на 7 %, несмотря на изменение магнитного поля Земли при переходе от северных широт к антарктическим и на наведенную индукцию во время стоянок в портах. Такая относительная стабильность позволяет применять годограф для оценки величины горизонтальной компоненты геомагнитного поля.

Первичные испытания проводились во время пробного выхода «Адмирала Владимирского» в Балтийское море 28 ноября 2019 года.

Циркуляция судна показана на рис. 3, район циркуляции – Балтийское море, широта 29,24°, долгота 60,08°. Курс определялся по датчику GPS комплекса.

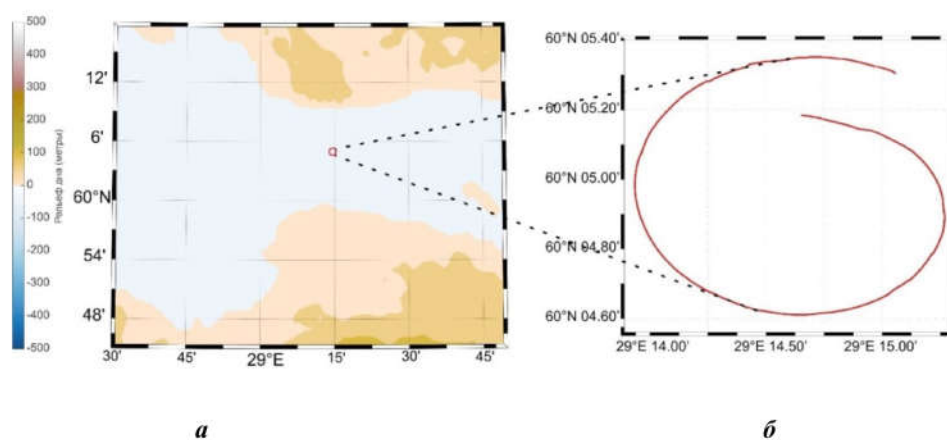


Рис. 3. Циркуляция в Финском заливе, выполненная 28 ноября 2019 г.

Полученные значения компонент показаны на рис. 4. Для сравнения на том же рисунке приведены компоненты, вычисленные по модели IGRF и пересчитанные в корабельную систему координат.

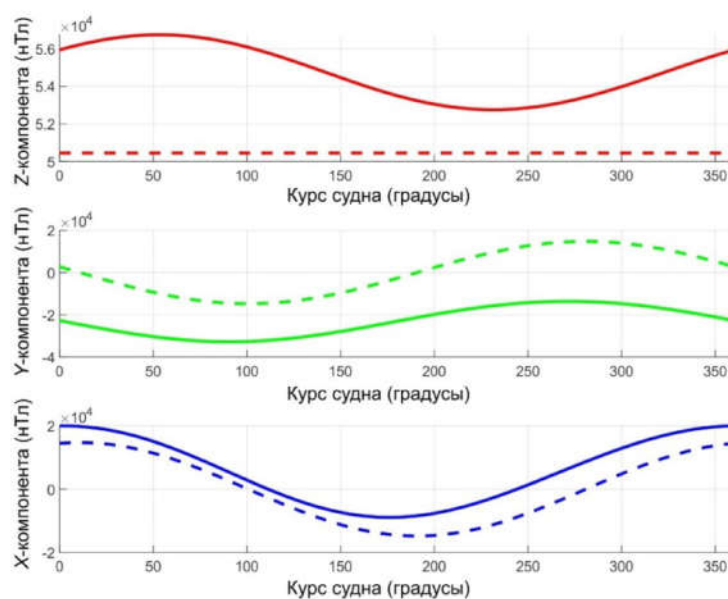


Рис. 4. Измеренные компоненты в корабельной системе координат. Сплошная линия – измеренные значения. Пунктирная линия – вычисленные по модели IGRF

Видно, что максимальное значение X достигается почти при нулевом курсе, т. е. полученное по анализу годографа значение склонения составляет несколько градусов, в то время как по моделям главного геомагнитного поля оно составляет примерно $12,5^\circ$. Состоит ли причина этого расхождения в ошибках метода, или имеет место локальная аномалия (мелкое море), – неизвестно. Использование всех данных для расчета склонения см. ниже.

Отметим, что амплитуда колебаний вертикальной компоненты составляет около 2000 нТл. Если приравнять среднее значение вертикальной компоненты к величине, полученной из модели IGRF, то получим, что амплитуда колебаний Z составляет около 4 %. Поскольку качки во время измерений не наблюдалось, это дает оценку изменений вертикальной компоненты собственного поля судна в зависимости от курса, т. е. оценку коэффициентов g и h матрицы Пуассона в формуле (1). В данной работе мы не рассматриваем этот вопрос.

Годограф и эллипс, найденный для циркуляции в Финском заливе показаны на рис. 5а. На рисунке 5б приведен годограф и найденный эллипс, построенные по циркуляции у южного берега Африки (точка показана на рис. 2 серым цветом).

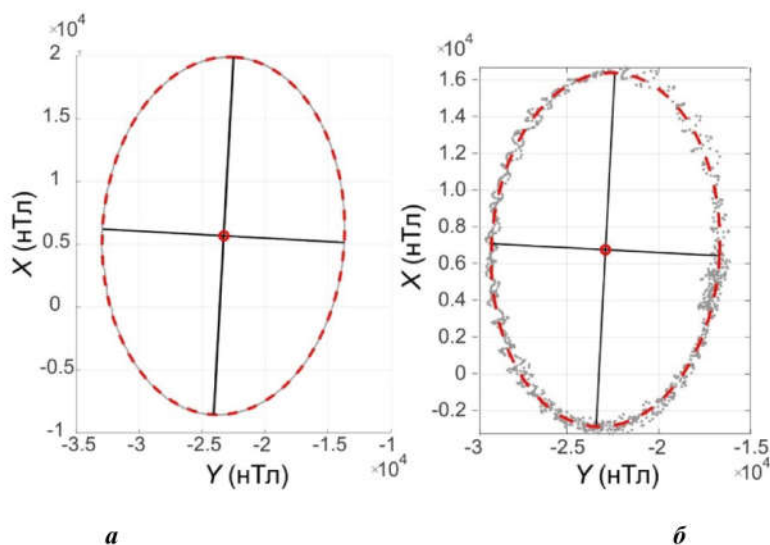


Рис. 5. Годограф и найденный эллипс для двух циркуляций: а – Финский залив, б – южный берег Африки. Серым цветом показан годограф, красным – найденный эллипс, черным – оси эллипса

Обращает на себя внимание, что:

- зашумленность кривой годографа в случае циркуляции в Финском заливе очень мала в отличие от других циркуляций (см. рис. 5б);
- оси эллипса почти параллельны осям корабельной системы координат – угол между длинной осью эллипса и осью x_s составляет около 3 градусов.

После поворота на азимут курса получаем величины компонент X , Y в топографической системе координат. При отсутствии шумов и угле β , равном нулю, это должны быть постоянные величины. Реальные кривые показаны на рис. 6 (значения курса приведены с учетом перехода через 360°).

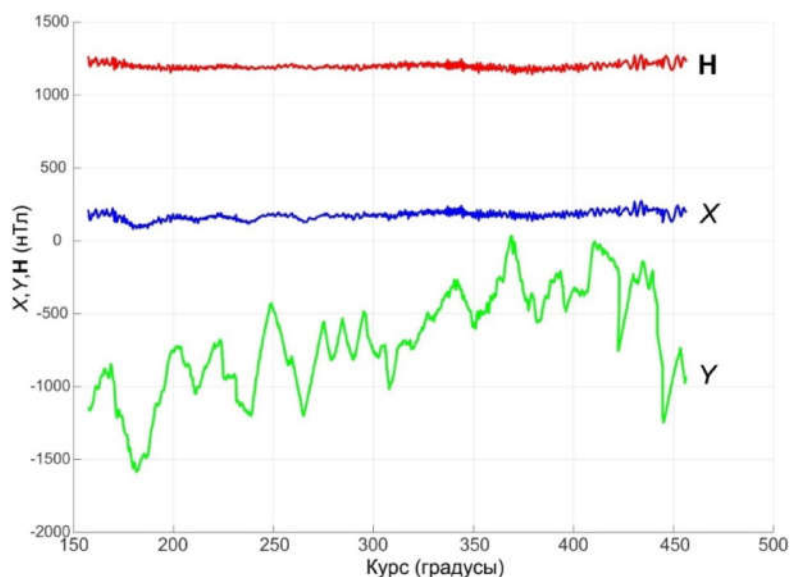


Рис. 6. Компоненты геомагнитного поля, приведенные к топографической системе координат по данным циркуляции в Финском заливе. Зеленым цветом показана компонента Y , синим – компонента X минус 12000 нТл, красным – величина горизонтальной компоненты H минус 11000 нТл

На рис. 6 обращает на себя внимание, что меньшая по величине компонента Y имеет значительно больший по сравнению с X разброс. Для выяснения причин наблюдаемого факта мы провели исследование, используя следующую модель. Пусть измерения выполнялись на немагнитном судне (исключаем поле носителя), идущим измеряемым курсом k . При этом азимут диаметральной плоскости корабля p отличается от курса на угол r , который можно рассматривать как погрешность измерения k , т. е. $k=p+r$. Эта погрешность может быть связана как с отклонением направления диаметральной плоскости корабля от направления движения (снос), так и с точностью определения координат. В этом случае измеренные в судовой системе координат значения компонент можно представить как $\mathbf{H}_s = \mathbf{M}_p \mathbf{H}$, где \mathbf{M}_p – матрица поворота на угол p . Имея в распоряжении лишь величину k , за истинное значение горизонтальной составляющей мы должны принять $\mathbf{H}'_s = \mathbf{M}_k \mathbf{H}_s = \mathbf{M}_k \mathbf{M}_p \mathbf{H}$. Для компонент получаем:

$$\begin{aligned} X' &= \cos r X + \sin r Y \\ Y' &= -\sin r X + \cos r Y \end{aligned}$$

или с учетом малости r с точностью до слагаемых порядка Hr^2

$$\begin{aligned} X' &= X + rY + O(r^2) \\ Y' &= -rX + Y + O(r^2) \end{aligned}$$

Если измерения проводятся вне района больших значений склонения, как в рассматриваемом случае, и величина X много больше Y , то ошибка rX в определении Y много больше ошибки rY в определении X .

Получены следующие оценки склонения $\arctg(Y'/X')$: среднее значение $-3,1^\circ$ и величина стандартного отклонения $1,6^\circ$ показаны на рис. 7.

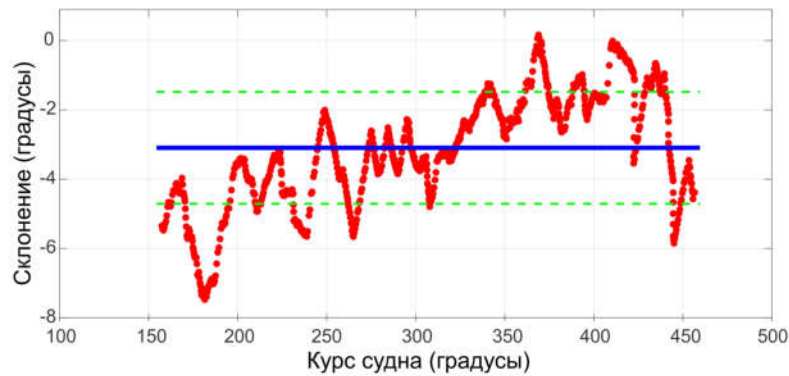


Рис 7. Пример определения склонения по данным циркуляции в Финском заливе. Красным цветом показаны значения склонения, голубым – среднее, зеленым – среднее плюс/минус стандартное отклонение

Как уже упоминалось выше, всего за кругосветный рейс было выполнено 10 циркуляций, в том числе по типу «звезда». Одна из таких циркуляций была выполнена вблизи Антарктиды в море Беллинсгаузена (желтый кружок на рис. 2). Девиационные работы проводились на восьми курсах с шагом по азимуту в 45° . Полученные значения компонент пересчитывались в топографическую систему координат по описанной выше методике, при этом стандартная ошибка определения склонения составляла около 2° . Затем определялись средние значения склонения на каждом курсе. После осреднения по курсам было получено значение склонения равно $19,10^\circ$ при стандартной ошибке в $0,42^\circ$. Значение склонения, вычисленное по модели IGRF, равно $22,6^\circ$. Результаты определения склонения по полученным данным приведены на рис. 8.

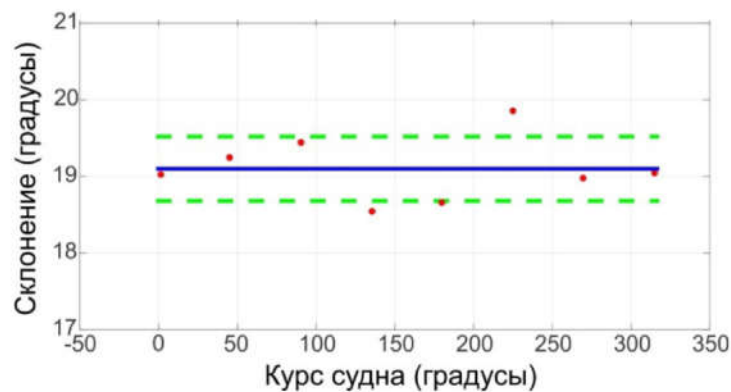


Рис. 8. Пример определения склонения по данным циркуляции в море Беллинсгаузена. Красным цветом показаны значения склонения, голубым – среднее, зеленым – среднее плюс/минус стандартное отклонение.

Выводы

1. Показано, что измерения горизонтальных компонент на нескольких (не меньше пяти) курсах при диагональной или почти диагональной матрице Пуассона позволяют:

а) оценить относительные изменения величины горизонтальной составляющей магнитного поля Земли;

б) оценить склонение.

2. При дополнительном измерении вертикальной компоненты можно оценить относительные изменения модуля магнитного поля Земли.

3. Рассмотрены теоретические вопросы, связанные с годографом – кривой, образованной горизонтальными компонентами (Y, X), измеренными в корабельной системе координат, когда корабль выполняет циркуляцию.

Получено:

а) в терминах матрицы Пуассона указан критерий параллельности осей годографа осей корабельной системы координат;

б) показано, когда горизонтальные компоненты внешнего поля восстанавливаются по годографу;

в) найдена причина большого шума в компоненте Y горизонтальной составляющей H .

Несмотря на ограниченную точность полученных результатов, метод представляется перспективным при условии оптимального размещения аппаратуры и организации измерений, что позволяет минимизировать внешние помехи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копытенко Ю. А., Петленко А. В., Петрова А. А., Копытенко Е. А., Воронов П. М., Исмагилов В. С., Зайцев Д. В., Тимошенко Ю. П. Peculiarities of interpretation of magnetic field components' data obtained at high-latitudes on the board of moving carrier. In: Proceedings of the International Conference on Marine Electromagnetic: Marelec 97: 23–26 June 1997. London UK. – 1997. – Pp. 1–6.
2. Копытенко Е.А., Тимошенко Ю.П., Воронов П.М. Измерения геомагнитного поля на борту движущегося носителя с помощью трехкомпонентного магнитовариационного комплекса МВК-2. // Российский Геофизический журнал. – 1998. – № 11–12. – С. 45–49.
3. Isezaki N. A new shipboard three-component magnetometer // Geophysics. – 1986. – V. 51. – No. 10. – P. 1992–1998. URL: <https://doi.org/10.1190/1.1442054>.
4. Бледнов В. А. Компонентные геомагнитные измерения на борту движущегося ферромагнитного носителя // УФН. – 1994. – Т. 164. – С. 1001–1005. URL: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0164.199409i.1001>.
5. Yigitler H., Leblebicioğlu M. K. Online Calibration of Strapdown Magnetometers / IFAC Proceedings Volumes. – 2009. – V. 42 – No 16. – Pp. 687–692. URL: <https://doi.org/10.3182/20090909-4-JP-2010.00116>.
6. Olsen N., Tøffner-Clausen L., Sabaka T. J. et al. Calibration of the Ørsted vector magnetometer // Earth Planet Space. – 2003. – . 55. – Pp. 11–18. URL: <https://doi.org/10.1186/BF03352458>.
7. Munsch M., Boulanger D., Ulrich P., Bouiflane M. Magnetic mapping for the detection and characterization of UXO: use of multi-sensor fluxgate 3-axis magnetometers and methods of interpretation // Journal of Applied Geophysics. – 2007. – V. 61. – Pp. 168–183. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.06.004>.
8. Renaudin V., Afzal M. H., Lachapelle G. Complete Triaxis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain // Journal of Sensors. – 2010. – V. 2010. Article ID 96724. – P.10. URL: <https://doi.org/10.1155/2010/967245>.
9. Merayo J. M. G., Brauer P., Primdahl F., Petersen J. R., Nielsen O. V. Scalar calibration of vector magnetometers // Meas. Sci. Technol. – 2000. – V. 11. No. 2. – Pp. 120–132. URL: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/2/304>

10. Bronner A., Munsch M., Sauter D., Carlut J., Searle R., Maineult A. Deep-tow 3C magnetic measurement: Solutions for calibration and interpretation // – 2013. – Geophysics. – V. 78. – No. 3. – Pp. 115–123. URL: <https://doi.org/10.1190/geo2012-0214.1>.
11. Gavazzi B., Le Maire P., Mercier de Lépinay J., Calou P., Munsch M. Fluxgate three-component magnetometers for cost-effective ground, UAV and airborne magnetic surveys for industrial and academic geoscience applications and comparison with current industrial standards through case studies // Geomechanics for Energy and the Environment. – 2019. – V. 20. – 100117. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.03.002>.
12. Gebre-Egziabher D., Elkaim G. H., Powell J. D., Parkinson B. W. Calibration of Strapdown Magnetometers in Magnetic Field Domain // Journal of Aerospace Engineering. – 2006. – V. 19. – No. 2. – Pp. 87–102. DOI: 10.1061/(ASCE)0893-1321(2006)19:2(87).
13. Foster C. C., Elkaim G. H. Extension of a two-step calibration methodology to include nonorthogonal sensor axes // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2008. – V. 44. – No. 3. – P. 1070–1078. DOI:10.1109/TAES.2008.4655364.
14. Меркурьев С. А., Боярских В. Г., Демина И. М., Иванов С. А., Солдатов В. А. Определение Положения Южного магнитного полюса по данным российских кругосветных экспедиций: 1820 г. (Беллинсгаузен), 2020 г. («Адмирал Владимирский») Часть 2. Экспедиция ОИС «Адмирал Владимирский» // Геомagnetизм и аэрономия. – 2023. – Т. 63. – № 1. – С. 125–136.
15. Гордин В. М., Розе Е. Н., Углов Б. Д. Морская магнитометрия. – М.: Недра. – 1986. – 231 с.
16. Кожухов В. П., Воронов В. В., Григорьев В. В. Магнитные компасы. Учебник для вузов. М.: Транспорт, 1981. – 212.
17. Крылов А.Н. Собрание трудов. Том II: часть I – Компасное дело. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1943. – 180 с.
18. Крылов А. Н. Собрание трудов. Том II: часть II – Земной магнетизм и компасное дело. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1947. – 274 с.
19. Ефимов Н.В. Краткий курс аналитической геометрии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 240 с.
20. Vasconcelos J. F., Elkaim G., Silvestre C., Oliveira P., Cardeira P. Geometric approach to strapdown magnetometer calibration in sensor frame // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2011. – V. 47. – No. 2. – Pp.1293–1306. doi: 10.1109/TAES.2011.5751259.
21. Caiming Z., Shixiang J., Peipei L. A New Method of Fitting Implicit Conic to Plane Scattered Data Points // Computer-Aided Design and Applications. – 2012. – V. 9. – No. 2. – P. 147–154. doi: 10.3722/cadaps.
22. Fitzgibbon A. W., Fisher R. B. A Buyer's Guide to Conic Fitting / Proceedings of the British Machine Vision Conference. – 1995. BMVC 1995, Birmingham, UK, September.
23. Чуриков А. Б., Андрианов Д.С., Бельченко К. Г. Использование метода наименьших квадратов в задаче определения эллипса годографа вектора напряженности магнитного поля. // Гироскопия и навигация. – 1996. – № 1. – С. 60–65.
24. Renaudin V., Afzal M. H., Lachapelle G. Complete Triaxis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain // Journal of Sensors. V. 2010. Article ID 967245. 10 p. doi:10.1155/2010/967245
25. Копытенко Ю. А., Копытенко Е. А., Зайцев Д. В., Воронов Р. М., Амосов Л. Г. Magnetovariation complex MVC-2 / Proc. of the VI-th Workshop on Geomagnetic Observatory Instr., Data Acquisit. and Processing. Belgium. – 1994. – P. 10.
26. Сергушин П. А., Солдатов В. А., Меркурьев С. А. Опыт компонентных измерений магнитного поля на борту ферромагнитного судна «Адмирал Владимирский» в ходе кругосветной экспедиции 2019–2020 гг. Сборник материалов конференции «Инженерная и рудная геофизика 2023», «Инженерная и рудная геология 2023» / «Морские технологии 2023» – Санкт-Петербург, Россия, 15 – 19 мая 2023 г.
27. Маргелов А. Магниторезистивные датчики положения компании Honeywell. // CHIP News – инженерная микроэлектроника. – 2005. – № 3. – С. 30–34.

HODOGRAPH AND MEASUREMENT OF HORIZONTAL COMPONENTS OF THE GEOMAGNETIC FIELD ON A FERROMAGNETIC VESSEL

S. A. Ivanov (SPbF IZMIRAN), **S. A. Merkuryev** (SPbF IZMIRAN, Saint-Petersburg State University), **I. M. Demina** (SPbF IZMIRAN)

The hodograph is under consideration – the curve (Y,X), where X and Y are the horizontal components of the Earth's magnetic field, measured in the ship's coordinate system during the ship's circulation. Examples of the application of the hodograph to data obtained during the expedition of the RV "Admiral Vladimírsky" in 2019–2020 are given.

УДК 528.9

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГОСУДАРСТВЕННЫХ МОРСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ КАРТ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

О. Д. ОСИПОВ (АО «ГНИНГИ»),
С. В. ТРАВИН (РГО)

Рассмотрены вопросы распространения электронных навигационных морских карт (ЭНК) через международные региональные координационные центры и возможность формирования российского центра распространения ЭНК.

Обеспечение мореплавателей навигационными морскими картами является одним из обязательств Российской Федерации по выполнению международных договоренностей в сфере обеспечения безопасности мореплавания в водах, на которые распространяется национальная юрисдикция.

В соответствии с Международной конвенцией по охране человеческой жизни на море 1974 г. (СОЛАС-74), которая была принята 1 ноября 1974 г. на Международной конференции по охране человеческой жизни на море (ратифицирована постановлением Правительства СССР от 2 ноября 1979 г. № 975 и вступила в силу 25 мая 1980 г.), глава 5, правило 9 определяет, что на национальные Гидрографические службы возложены следующие обязательства:

1. Договаривающиеся правительства обязуются поощрять сбор и накопление гидрографических данных, публикацию, распространение и поддержание на уровне современности всей относящейся к мореплаванию информации, необходимой для обеспечения безопасности судоходства.

2. В частности, Договаривающиеся правительства обязуются, насколько это практически возможно, сотрудничать в проведении следующих мероприятий по организации навигационно-гидрографического обеспечения мореплавания:

2.1. обеспечение выполнения гидрографических съемок, насколько это практически возможно в соответствии с требованиями, предъявляемыми к безопасности судоходства;

2.2. подготовка и издание морских навигационных карт, лоций, огней и знаков, таблиц приливов и других пособий для плавания;

2.3. распространение извещений мореплавателям, необходимых для поддержания морских навигационных карт и пособий на уровне современности;

2.4. принятие мер, обеспечивающих нормальное выполнение этих услуг.

3. Договаривающиеся правительства обязуются обеспечивать, по возможности, наибольшую унификацию карт и пособий для плавания и принимать во внимание, когда возможно, соответствующие международные резолюции и рекомендации.

4. Договаривающиеся правительства обязуются в максимально возможной степени координировать свою деятельность, с тем, чтобы обеспечивать во всемирном