

## ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

## Основные принципы определения компонент магнитного поля Земли на движущихся ферромагнитных объектах (основы теории разделения полей)<sup>1</sup>

В.А. Бледнов

*Рассмотрен метод определения компонент магнитного поля Земли (МПЗ) на движущихся объектах, имеющих собственное магнитное поле. На примере упрощенной схемы рассмотрен принцип решения задачи. Выведены уравнения, которые позволяют найти корректное решение как для упрощенной схемы, так и для реального движущегося ферромагнитного объекта. Приведен список ряда технических задач, реализуемых путем проведения измерений МПЗ и других магнитных полей с борта движущихся объектов, имеющих практически любой уровень собственного магнитного поля.*

PACS numbers: 94.30.-d, 94.80.+g

Известно, что в основе работ, направленных на создание методов определения параметров магнитного поля Земли (МПЗ) на движущихся объектах, имеющих собственное магнитное поле, лежат уравнения Пуассона [1]. Наиболее логичный вывод, который можно сделать из структуры уравнений, сводится к тому, что собственные поля ферромагнитных масс (ФМ) объекта являются главной помехой для проведения на нем геомагнитных измерений и что для исключения их влияния наиболее целесообразно использовать принцип компенсации. Надо только найти эффективный метод его практической реализации, и задача будет решена. Данное утверждение, которое до последнего времени считалось невыполнимым, долгие годы определяло направление развития подобных работ. Но во всех предлагаемых методах решения был существенный недостаток. Из-за непредсказуемости изменения намагниченности ФМ определение их собственных полей могло осуществляться только с некоторой степенью приближения. Это исключало возможность построения корректного решения задачи [2]. Тем не менее большое количество разработанных оригинальных методов составляет целую теорию, в основе которой лежит указанный принцип. В силу того, что Пуассон первый указал на возможность подобного решения, эта теория должна быть названа теорией девиации Пуассона (ТДП).

В.А. Бледнов. С.-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (СПбФ ИЗМИРАН)  
191023 С.-Петербург, Мучной пер. 2, Россия  
Тел. (812) 310-52-45. Факс (812) 310-50-35  
E-mail: galina@admin.izmi.ras.spb.ru

Статья поступила 15 января 1997 г.,  
после доработки 10 апреля 1997 г.

Дальнейшие исследования привели к созданию метода определения угловых компонент (МОУК), который практически полностью отличается от указанных [3–6]. В его основу была положена идея использования информации, имеющейся в составляющих собственного магнитного поля намагничиваемых МПЗ магнитомягких ферромагнитных масс. Использование подобной физической концепции полностью меняет подход к решению задачи. Исключается принцип компенсации, так как поля ферромагнитных масс объекта считаются уже не помехой, а источником полезной информации. Наличие ферромагнитных масс вблизи компонентного магнитометрического преобразователя также не увеличивает погрешности компонентных измерений МПЗ. Изменяется также методика сбора информации. Измерения группируются по сериям, в каждую из которых входит определенное количество одновременных опросов всех измерительных систем (цикл измерений). К движущемуся объекту предъявляется только одно требование — переориентация на крайне малые углы как минимум в двух любых взаимно ортогональных плоскостях. Обычно такое требование выполняется автоматически, так как при движении объект произвольно совершает подобные колебания. Результаты каждой выполненной серии измерений ложатся в основу системы векторных уравнений, решение которой позволяет определить параметры внешнего (по отношению к движущемуся объекту) магнитного поля. Этими полями могут быть МПЗ, межпланетное поле, сумма МПЗ и собственного поля какого-либо предмета, находящегося на определенном расстоянии от объекта. В частности, такими предметами могут быть трубопроводы, силовые

<sup>1</sup> Статья написана на основе доклада на Научной сессии Отделения общей физики и астрономии Российской академии наук (27 ноября 1996 г.).

кабели, металлические объекты различного назначения и т.д.

Рассмотренный принцип позволил разработать корректные методы решения задач определения угловых компонент МПЗ. Основные принципы МОУК и результаты натурных исследований, выполненные в результате реализации его на ферромагнитных морских судах, изложены в работах [4–6].

Однако МОУК позволял определять только угловые компоненты МПЗ, например магнитное наклонение и курс объекта. Это ограничивало полезную информацию и позволяло найти в заданной системе координат только направление вектора индукции МПЗ. В перечисленных работах утверждалось, что силовые компоненты, т.е. компоненты, измеряемые в нанотеслах, по результатам измерений, выполненных только на ферромагнитном объекте, корректным образом определить нельзя. Причина, исключая подобную возможность, обусловлена структурой векторного уравнения Пуассона [5], которая не позволяет отделить компоненты МПЗ от аналогичных по направлению компонент собственного магнитного поля объекта (СПО):

$$\mathbf{T}' = (|E| + |P|)|S|\mathbf{T} + \mathbf{T}_p, \tag{1}$$

где  $\mathbf{T}'$  — вектор индукции суммарного магнитного поля (СМП);  $|E|$ ,  $|P|$  — единичная матрица и матрица параметров Пуассона;  $|S| = |S_i||S_j||S_k|$  — матрица вращения, определяющая положение объекта в неподвижной в пространстве системе координат после поворотов на углы  $i, j, k$ ;  $\mathbf{T}$  — вектор индукции МПЗ;

$$\mathbf{T}_p = \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix}$$

— вектор индукции постоянного магнитного поля объекта.

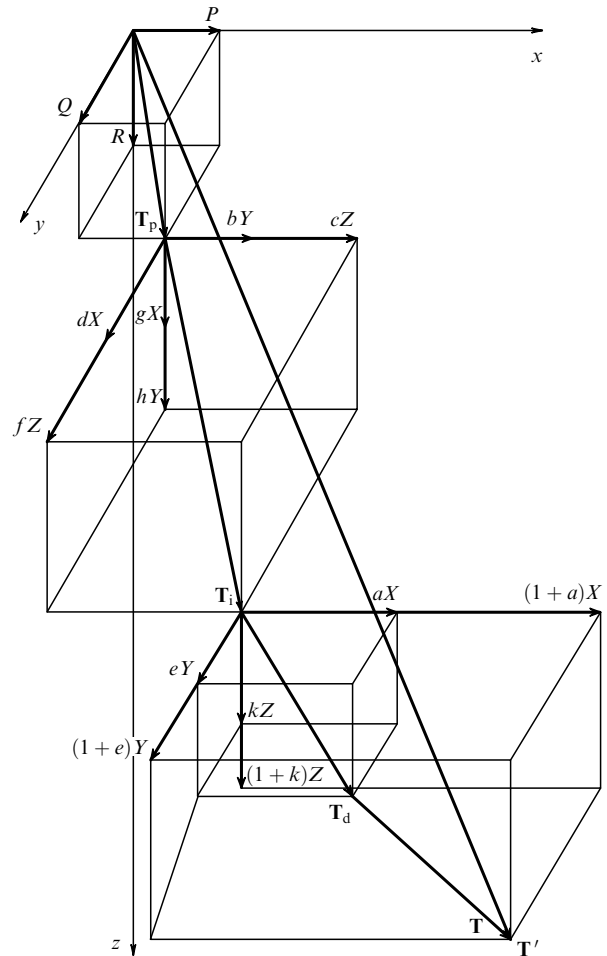
Оставаясь в рамках методики сбора информации, определяемой уравнением (1), которое в развернутом виде представляется как

$$\mathbf{T}' = \begin{pmatrix} 1+a & b & c \\ d & 1+e & f \\ g & h & 1+k \end{pmatrix} |S| \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где

$$|E| + |P| = \begin{pmatrix} 1+a & b & c \\ d & 1+e & f \\ g & h & 1+k \end{pmatrix}$$

— суммарная матрица, невозможно разделить составляющие  $1+a$ ,  $1+e$ ,  $1+k$  и вычислить силовые компоненты МПЗ:  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Из рисунка 1 видно, что существуют три составляющих СПО, которые по направлению совпадают с соответствующими компонентами МПЗ. Это и явилось причиной сделанного выше утверждения. Дальнейшие исследования, выполненные в этой области, показали ошибочность столь категоричного вывода. Следовало сделать более осторожное утверждение: оставаясь в рамках методики, предложенной в МОУК, решить задачу определения силовых компонент по результатам измерений, выполненных на борту движущегося ферромагнитного объекта, нельзя.



**Рис. 1.** Формирование суммарного магнитного поля на движущемся ферромагнитном объекте (ДФО):  $\mathbf{T}$ ,  $\mathbf{T}'$  — векторы МПЗ и СМП;  $\mathbf{T}_p(P, Q, R)$  — вектор и компоненты постоянного поля ДФО;  $\mathbf{T}_i(dX, gX, hY, cZ, fZ)$  — вектор и компоненты индуцированного поля ДФО;  $\mathbf{T}_d[(1+a)X, (1+e)Y, (1+k)Z]$  — вектор и компоненты поля, представляющего сумму компонент МПЗ и совпадающих с ними по направлению составляющих собственного индуцированного поля ДФО.

Информация, полученная при реализации МОУК, позволила создать более универсальный метод, который назван методом определения компонент (МОК). МОК основан на методике, позволяющей существенно изменить уравнения Пуассона и привести их к структуре, которая дает принципиальную возможность разделения компонент внешнего магнитного поля, в частности МПЗ, и составляющих собственного магнитного поля движущегося объекта. МОУК и МОК фактически являются основой теории, которая принципиально отличается от ТДП. Достаточно указать на одно из существенных различий (в определенной мере о нем сказано выше). Если в ТДП собственные поля ферромагнитных масс являются основной помехой при выполнении измерений МПЗ на его борту, то в рамках разрабатываемой теории эти же поля ферромагнитных масс являются источником информации о поле, которое их намагничивает, в частности этим полем является МПЗ. Эту теорию целесообразно назвать теорией разделения полей (ТРП). Как выяснилось при проведении исследований, ТРП по своим физическим принципам более соответствует процессам намагничивания и переманчивания ферромагнитных

масс, чем ТДП. И с этой точки зрения возможности ТРП превосходят возможности ТДП. ТРП позволяет по результатам измерений, которые выполнены на движущемся объекте, корректно определить как угловые, так и силовые компоненты внешнего магнитного поля. Практически полностью исключается зависимость точности определения компонент МПЗ от уровня и градиента собственных полей ферромагнитных масс в точке выполнения магнитных измерений. Значительно упрощается методика решения. Исключается необходимость говорить об ограничениях, накладываемых на процесс намагничивания и перемагничивания ферромагнитных масс движущегося объекта, и задача решается в самой общей ее постановке. Причем говорится о корректном решении, которое в соответствии с определением, введенным Тихоновым [2], предполагает наличие трех критериев: возможность решения задачи, его единственность и устойчивость. Требование, предъявляемое к поведению движущегося объекта, только одно: он должен переориентироваться в измеряемом поле в любых двух взаимно ортогональных плоскостях. Углы переориентации достаточно малы. Требование, предъявляемое в настоящее время, следующее: они должны быть порядка  $\pm 0,5^\circ$ . Обычно таким требованиям отвечают практически все объекты, движущиеся в "свободном" пространстве: под водой и на водной поверхности, в атмосфере и космическом пространстве. Следует отметить, что существует возможность в случае необходимости снизить требования, предъявляемые к диапазону изменения углов.

ТРП предполагает решение задачи в следующей постановке. На объект, произвольным образом движущийся в пространстве, воздействует векторное (внешнее) поле, имеющее определенную природу (поле не обязательно должно быть электромагнитным). В конструкции объекта имеются элементы, взаимодействующие с этим полем. Под его влиянием они генерируют собственное поле, имеющее ряд составляющих (в общем случае девять), модули и направления которых зависят от модуля и направления внешнего поля. Закон преобразования внешнего поля задается некоторым матричным оператором (обычно тензор второго ранга) с коэффициентами, которые в общем случае различны и изменяются во времени по случайному закону. Объект обладает свойством генерировать и излучать некоторое постоянное собственное поле той же природы (остаточное поле). Таким образом, в каждой точке пространства, где существует поле объекта, оно складывается с внешним полем. Этот процесс формирует суммарное векторное поле. Требуется по результатам измерений этого поля определить все компоненты внешнего поля и все составляющие собственного поля объекта. Рассмотрим метод решения данной задачи на примере взаимодействия МПЗ с движущимся ферромагнитным объектом.

Для определения физических принципов предлагаемого метода определения компонент МПЗ рассмотрим пример формирования суммарного магнитного поля на следующей конструкции. Имеется ферромагнитный стержень (ФС), на котором жестко закреплен компонентный магниточувствительный преобразователь (МЧП). На этом же стержне установлена дополнительная ферромагнитная масса (ДФМ), собственное поле которой действует на ФС. Таким образом, суммарное магнитное поле состоит из МПЗ, собственного поля ФС и собствен-

ного поля ДФМ. Будем считать, что измерения осуществляются в плоскости геомагнитного меридиана: горизонтальная компонента МПЗ —  $H$ , вертикальная компонента —  $Z$ . ФС имеет возможность переориентироваться в этой плоскости на угол  $j$  (рис. 2). ДФМ, двигаясь вместе с ФС, имеет возможность менять свое положение относительно ФС. Далее будем полагать, что собственное поле ФС в точке установки МЧП определяется только одним параметром Пуассона  $a$ . Собственное поле ДФМ в точке установки МЧП также определяется только одним параметром Пуассона  $a_1$  и, меняя свое положение относительно МЧП, изменяет этот параметр на  $a_2$ . При таких предположениях уравнение Пуассона для первого случая положения ДФМ будет следующим:

$$T'_1 = (1 + a + a_1)H \cos j + (1 + a + a_1)Z \sin j + P + P_1, \quad (3)$$

где  $P, P_1$  — постоянные составляющие собственного поля ФС и ДФМ соответственно.

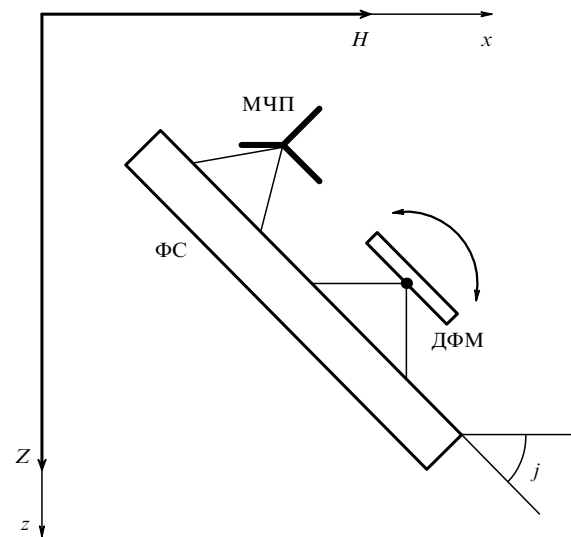


Рис. 2. Схема реализации метода определения силовых компонент на движущемся ферромагнитном объекте: МЧП — магниточувствительный преобразователь; ФС — ферромагнитный стержень; ДФМ — дополнительная ферромагнитная масса;  $H, Z$  — компоненты МПЗ;  $j$  — угол переориентации ДФМ в системе координат  $x, y$ .

Если изменение положения ДФМ относительно МЧП происходит значительно быстрее, чем изменение ориентации ФС в МПЗ (изменение угла  $j$ ), то аналогичное уравнение для другого положения ДФМ будет таким:

$$T'_2 = (1 + a + a_2)H \cos j + (1 + a + a_2)Z \sin j + P + P_2. \quad (4)$$

Вычислив разность уравнений (3) и (4), получим

$$T'_1 - T'_2 = (a_1 - a_2)H \cos j + (a_1 - a_2)Z \sin j + P_1 - P_2. \quad (5)$$

Из (5) видно, что разность суммарных полей не зависит от собственного магнитного поля ФС. После выполнения трех циклов подобных измерений составляется система уравнений и в результате ее решения опреде-

ляются следующие величины:

$$\begin{aligned} H_r &= (a_1 - a_2)H, \\ Z_r &= (a_1 - a_2)Z, \\ P_r &= P_1 - P_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Из них, согласно принципам МОУК, определяются угловые компоненты МПЗ [3–5].

Для определения силовых компонент, а именно  $H$  и  $Z$ , необходимо найти способ разделения сомножителей  $a_1 - a_2$  и  $H$ ,  $a_1 - a_2$  и  $Z$ . Для этого воспользуемся приемом, предполагающим выполнение измерений при воздействии на ДФМ известного магнитного поля  $X_s$ . В этом случае уравнения (3) и (4) примут вид

$$\begin{aligned} T'_{1s} &= (1 + a)H \cos j + (1 + a)Z \sin j + \\ &+ a_1(H \cos j + Z \cos j + X_s) + P + P_1, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} T'_{2s} &= (1 + a)H \cos j + (1 + a)Z \sin j + \\ &+ a_2(H \cos j + Z \sin j + X_s) + P + P_2. \end{aligned} \quad (8)$$

Разность уравнений (7) и (8) будет следующей:

$$\begin{aligned} T'_{1s} - T'_{2s} &= (a_1 - a_2)H \cos j + (a_1 - a_2)Z \sin j + \\ &+ (a_1 - a_2)X_s + P_1 - P_2. \end{aligned} \quad (9)$$

Если далее определить разность уравнений (8) и (5), то получим

$$(T'_{1s} - T'_{2s}) - (T'_1 - T'_2) = (a_1 - a_2)X_s. \quad (10)$$

Из (10) вычисляем разность параметров Пуассона:

$$a_1 - a_2 = \frac{(T'_{1s} - T'_{2s}) - (T'_1 - T'_2)}{X_s}. \quad (11)$$

Из (11) следует, что проведя ряд измерений по указанной методике, получаем возможность оперативного определения разности параметров Пуассона, входящих в систему, составленную из уравнений (5) и имеющую решение (6). Из последнего вычисляются *силовые компоненты МПЗ или любого другого поля, которое является внешним магнитным полем по отношению к движущемуся ферромагнитному объекту:*

$$H = \frac{H_r X_s}{\Delta T_s - \Delta T_1}, \quad (12)$$

где  $\Delta T_s = T'_{1s} - T'_{2s}$ ,  $\Delta T_1 = T'_1 - T'_2$ . Далее по методике реализации МОУК вычисляются составляющие собственного индуцированного магнитного поля ФС:  $aH$ ,  $aZ$ , а также величина постоянного поля  $P$ .

Рассмотрим теперь возможность решения поставленной задачи на реальном движущемся объекте без каких-либо ограничений общности задачи. В этом случае МЧП установлен на движущемся ферромагнитном объекте (ДФО). На объекте установлена и дополнительная ферромагнитная масса, собственное поле которой действует на МЧП. ДФМ может менять свою ориентацию относительно МЧП. В этом случае векторное уравнение Пуассона (2) при одном из положений ДФМ имеет следующий

вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}'_1 &= \begin{vmatrix} 1 + a + a_1 & b & c \\ d & 1 + e + e_1 & f \\ g & h & 1 + k + k_1 \end{vmatrix} |S| \mathbf{T} + \\ &+ (\mathbf{T}_p - \mathbf{T}_{1p}). \end{aligned} \quad (13)$$

Это же уравнение (13) при другом положении ДФМ будет иметь вид

$$\begin{aligned} \mathbf{T}'_2 &= \begin{vmatrix} 1 + a + a_2 & b & c \\ d & 1 + e + e_2 & f \\ g & h & 1 + k + k_2 \end{vmatrix} |S| \mathbf{T} + \\ &+ (\mathbf{T}_p - \mathbf{T}_{2p}). \end{aligned} \quad (14)$$

Если измерения выполнены так, что в уравнениях (13) и (14) сохраняется равенство матриц  $|S|$ , то

$$\begin{aligned} \mathbf{T}'_1 - \mathbf{T}'_2 &= \begin{vmatrix} a_1 - a_2 & 0 & 0 \\ 0 & e_1 - e_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_1 - k_2 \end{vmatrix} |S| \mathbf{T} + \\ &+ (\mathbf{T}_{1p} - \mathbf{T}_{2p}). \end{aligned} \quad (15)$$

Выполнив серию измерений в соответствии с указанной методикой, получим систему векторных уравнений, решение которой значительно упрощается. Это определяется преобразованием квадратной матрицы уравнения (2) в диагональную матрицу уравнения (15). Кроме того, матрица уравнения (15) составлена из параметров Пуассона, формируемых намагничиванием не ФМ объекта, а ДФМ.

Таким образом, после решения системы, составленной из уравнений (15), получим следующие величины, адекватные составляющим собственного поля ДФМ:

$$\begin{aligned} X_r &= (a_1 - a_2)X, \\ Y_r &= (e_1 - e_2)Y, \\ Z_r &= (k_1 - k_2)Z, \\ T_r &= T_{1p} - T_{2p}. \end{aligned} \quad (16)$$

Как было установлено, для определения силовых компонент  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  необходимо разделить сомножители произведений (16). Воспользуемся предложенным методом, основанным на использовании эталонных полей  $X_s$ ,  $Y_s$ ,  $Z_s$ .

Включим в измерительную систему источники эталонного поля, которые жестко связаны с ДФМ. Эти поля совместно с соответствующими компонентами МПЗ действуют на ДФМ и индуцируют в ней магнитный момент. Он, в свою очередь, создает магнитное поле, которое отличается от МПЗ на величину компоненты эталонного поля. Измерения суммарного магнитного поля можно выполнить как при выключенном источнике эталонного поля, так и при включенном. В последнем случае разность уравнений Пуассона аналогично разности (15) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \mathbf{T}'_{1s} - \mathbf{T}'_{2s} &= \begin{vmatrix} a_1 - a_2 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 - b_2 & 0 \\ 0 & 0 & c_1 - c_2 \end{vmatrix} |S| (\mathbf{T} + \mathbf{T}_s) + \\ &+ (\mathbf{T}_{1p} - \mathbf{T}_{2p}). \end{aligned} \quad (17)$$

Решение системы, составленной из уравнений подобных (17), позволяет определить составляющие собственного магнитного поля объекта:

$$\begin{aligned} X'_s &= (a_1 - a_2)(X + X_s), \\ Y'_s &= (b_1 - b_2)(Y + Y_s), \\ Z'_s &= (c_1 - c_2)(Z + Z_s). \end{aligned} \quad (18)$$

Найдя разность между соответствующими компонентами выражений (16) и (18), получим

$$\begin{aligned} X'_s - X'_r &= (a_1 - a_2)X_s, \\ Y'_s - Y'_r &= (b_1 - b_2)Y_s, \\ Z'_s - Z'_r &= (c_1 - c_2)Z_s. \end{aligned} \quad (19)$$

Из выражений (19) определяем разность параметров Пуассона для ДФМ, существующих в момент измерений. По их известным значениям вычисляются силовые компоненты МПЗ:

$$\begin{aligned} a_1 - a_2 &= \frac{X'_s - X'_r}{X_s}, \\ b_1 - b_2 &= \frac{Y'_s - Y'_r}{Y_s}, \\ c_1 - c_2 &= \frac{Z'_s - Z'_r}{Z_s}. \end{aligned} \quad (20)$$

Если из (20) определить разность параметров Пуассона для ДФМ, то из соответствующих уравнений (16) можно вычислить силовые компоненты МЧП:

$$\begin{aligned} X &= \frac{X_r X_s}{X'_s - X'_r}, \\ Y &= \frac{Y_r Y_s}{Y'_s - Y'_r}, \\ Z &= \frac{Z_r Z_s}{Z'_s - Z'_r}. \end{aligned} \quad (21)$$

Сравнивая уравнения (12) и (21), можно сделать один интересный вывод: уравнения для определения силовых компонент ферромагнитного стержня с простейшим собственным магнитным полем не сложнее уравнений для определения силовых компонент на ферромагнитном объекте с совершенно непредсказуемыми характеристиками собственного магнитного поля. Необходимо только точно придерживаться технологии, разработанной при реализации МОУК, и учитывать процессы перемагничивания ферромагнитных масс ДФО.

Главный результат создания ТРП заключается в том, что появилась возможность для проведения исследований геомагнитного поля и магнитных полей космического пространства использовать движущиеся объекты практически любого типа. К конструкциям этих аппаратов не предъявляется никаких требований по формированию их собственного магнитного поля. И вообще, используя предполагаемую технологию, можно забыть о влиянии собственных полей движущихся объектов на результаты измерений внешнего магнитного поля.

Помимо выполнения измерений для фундаментальных исследований МПЗ или межпланетных полей, появляется возможность решать большое число прикладных задач. Основой их реализации является возмож-

ность измерять *внешнее* по отношению к движущемуся аппарату магнитное поле, которое представляет сумму МПЗ и поля ферромагнитного предмета, в котором находится измеритель. Эти поля достаточно просто разделить, учитывая различия их спектральных характеристик. Анализируя составляющие поля объекта можно определить как стандартное поле, свойственное только что созданной конструкции, так и отклонения от него, возникшие в процессе эксплуатации. В качестве примеров прикладных задач, которые могут быть решены с использованием магнитометрических методов, являются следующие:

1. Проведение геомагнитных исследований на ДФО.
2. Определение магнитного курса ДФО.
3. Осуществление наземной и подводной геомагнитной навигации ДФО.
4. Обнаружение и картирование трасс магистральных нефте- и газопроводов.
5. Диагностика технического состояния нефте- и газопроводов, а также обнаружение мест их аварийного состояния.
6. Обнаружение и картирование трасс силовых кабельных линий.
7. Диагностика технического состояния силовых кабельных линий, обнаружение мест нарушения изоляции и обрыва.
8. Размагничивание различных объектов (судов).
9. Создание системы позиционирования полупогруженных буровых установок (обеспечение бурения, фиксация критического отклонения оси буровой установки от оси устья подводной скважины (УПС), вторичный поиск УПС после запланированного или аварийного прерывания процесса бурения; все энергетические системы и системы контроля находятся на борту буровой установки).
10. Поиск скрытых металлических предметов (подводных, подземных) непосредственно с ДФО.
11. Поиск месторождений нефти и газа.

Указанные работы могут выполняться практически на любых ДФО. Это подводные и надводные суда, самолеты различного назначения (вплоть до самых малых), спутники, космические объекты. Как уже отмечалось, не предъявляется никаких требований к уровню и градиентам собственного магнитного поля ДФО.

В настоящее время имеется измерительная система, на которой были отработаны технологические приемы реализации геомагнитных измерений на ДФО. Этим объектом было ферромагнитное судно. Программа испытаний включала измерения, выполненные на "спокойной" морской поверхности и во время восьмибального шторма. Во время этих исследований отработаны технические приемы, необходимые для реализации перечисленных выше задач. Создание конкретной измерительной системы заключается в согласовании требований, предъявляемых к техническим характеристикам прибора, и типа движущегося объекта, который необходим для выполнения измерений. Всегда существует несколько типов решения, и поэтому необходимо еще выбрать наиболее целесообразное, которое учитывало бы точность работы системы, ее надежность и стоимость. Технология реализации любой из перечисленных задач включает создание действующей модели, имеющей небольшую стоимость. На ней реализуется согласование технических возможностей с требованиями заказ-

чика (обычно после знакомства с моделью они значительно шире, чем при составлении технического задания), а затем отработанная модель может быть установлена на указанный движущийся объект.

Приведенные результаты исследований по определению силовых компонент МПЗ на ДФО получены благодаря поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 96-05-64230).

## Список литературы

1. Крылов А Н *Основная теория девиации магнитного компаса* Т. 2 *Компасное дело (Собр. тр. акад. А.Н. Крылова)* (М.: Морской транспорт, 1943) с. 3
2. Тихонов А Н, Арсенин В Я *Методы решения некорректных задач* (М.: Наука, 1986)
3. Бледнов В А Авт. свид. 854156 СССР *Способ определения направления вектора магнитной индукции геомагнитного поля Бледнова* (1980)
4. Blednov V A, in *Russian Airborne Geophysics and Remote Sensing, SPIE Vol. 2111* (Eds N Harthill, H Leek) (Golden: Colorado School of Mines ISBN 0-8194-1402-6, 1992) p. 203
5. Бледнов В А *УФН* **164** 1001 (1994)
6. Бледнов В А *ДАН* **341** (2) 251 (1995)

### Basic principles for determining the Earth's magnetic field component on moving ferromagnetic objects (fundamentals of field separation theory)

V.A. Blednov

*St.-Petersburg Branch of the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere & Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences (SPbF IZMIRAN), Muchnoï per. 2, 191023 St.-Petersburg, Russia*  
 Tel. (7-812) 310-52 45  
 Fax (7-812) 310-50 35  
 E-mail: galina@admin.izmi.ras.spb.ru

A method for determining the Earth's magnetic field component on a moving object having its own magnetic field is presented. A simplified scheme is considered to illustrate the problem solution method. Equations yielding a correct solution for both the simplified scheme and a real moving ferromagnetic object are derived. Technological problems are listed that can be solved by measuring the Earth's and other magnetic fields onboard a moving object with an arbitrary magnitude of its own magnetic field.

PACS numbers: **94.30.-d**, **94.80. + g**

Bibliography — 6 references

*Received 15 January 1997, revised 10 April 1997*