

Научная сессия Отделения общей физики и астрономии Российской академии наук

(25 мая 1994 г.)

25 мая 1994 г. в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии РАН. На сессии были заслушаны доклады:

1. К.М. С а л и х о в. Пространственная организация спиновой поляризации в твердых парамагнетиках.

2. В.А. Б л е д н о в. Компонентные геомагнитные измерения на борту движущегося ферромагнитного носителя.

Краткое содержание одного доклада публикуется далее.

PACS numbers: 91. 25

В.А. Бледнов. Компонентные геомагнитные измерения на борту движущегося ферромагнитного носителя. В излагаемой работе рассматривается принципиально новый метод векторных геомагнитных измерений на борту движущегося ферромагнитного носителя [1], названный методом определения угловых компонент (МОУК). В отличие от существующих методов, большинство из которых в той или иной мере использует принципы компенсации, МОУК основан на эффектах, возникающих при намагничивании магнитомягких ферромагнитных масс (ФМ) носителя геомагнитным полем (ГМП). Собственные поля ФМ-носителя рассмотрены не как помеха, а как источник информации, что дало возможность поставить задачу об определении параметров намагнитившего их первичного, в данном случае геомагнитного, поля. Учитывая необходимость получения решения, которое имело бы не только теоретическое, но и практическое значение, изучена возможность создания метода, в рамках которого определение параметров ГМП было бы корректным [2]. Другие решения, предполагающие существование особых условий намагничивания ФМ-носителя, в частности длительная стабильность параметров Пуассона, не рассматривались. Такая постановка задачи обусловила необходимость классифицировать компоненты ГМП по признаку возможности их корректного определения на основе информации, имеющейся на борту носителя. Оказалось, что только угловые компоненты (УК), т.е. компоненты, определяющие направление вектора индукции ГМП (в частности, магнитное наклонение, магнитный курс), могут быть отнесены к таким составляющим ГМП. Силовые компоненты, такие, как модуль вектора и любые его составляющие, измеряемые в нТл, относятся к группе характеристик ГМП, определение которых на борту носителя возможно только с ограниченной точностью и только при ряде допущений [3, 4]. Это определило главное направление в исследовании поставленной проблемы, так как высокая точность вычисления компонент ГМП должна быть достигнута при следующих условиях:

— измерения осуществляются только на борту носителя;

— магнитное поле носителя формируется при постоянном и произвольном процессе воздействия на корпус большого количества внешних сил (упругие напряжения различного вида, переменные магнитные поля, изменения температуры и т.д.);

— собственное магнитное поле носителя (СПН) может иметь любую структуру (любой градиент) и меняться от самого низкого до максимально высокого значения;

— полное отсутствие предварительной информации о ГМП и о параметрах СПН.

В каждый относительно короткий отрезок времени намагниченность ФМ состоит из постоянной части, определяющей средний уровень, и переменной. Постоянная часть является результатом условий, существовавших в относительно отдаленном по времени процессе намагничивания. Переменная (индуцированная) часть отражает воздействие действующего в данный момент намагничивающего поля, и ее характер зависит от соотношений между его компонентами. Поэтому при достаточно медленном изменении параметров внешнего поля, когда магнитной вязкостью можно пренебречь, индуцированная намагниченность ФМ-носителя, а следовательно, и изменение составляющих его собственного магнитного поля зависят от параметров намагничивающего поля. Если считать, что за время сбора информации перемагничивание ФМ, имеющих различные, но относительно большие по величине коэффициенты размагничивания, осуществляется при влиянии крайне малых, по отношению к коэрцитивной силе, изменениях внешнего поля и относительно малых изменениях внешних сил, то можно использовать линейную модель формирования их собственного магнитного поля. Это одна из главных гипотез МОУК, которая требовала доказательства и разработки специальной технологии сбора информации.

Для объяснения физических особенностей МОУК рассмотрим простейшую модель решения поставленной задачи. Полагаем (рис. 1), что устройство, состоящее из компонентного магниточувствительного преобразователя (МЧП), жестко связанного с ферромагнитным

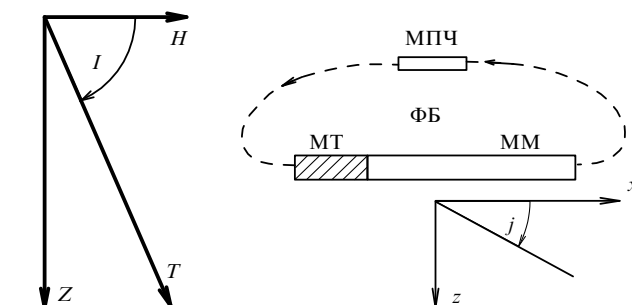


Рис. 1

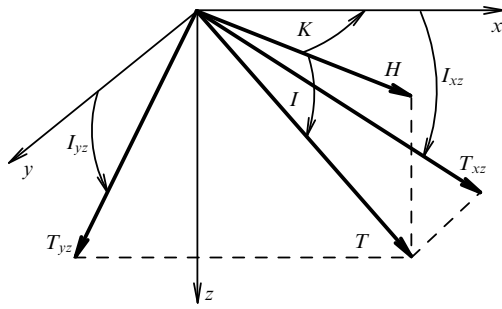


Рис. 2

стержнем (ФС), установлено в ГМП. Оно имеет возможность переориентироваться в плоскости геомагнитного меридиана на некоторые углы j . ФС имеет постоянную и индуцированную намагниченность. Если полагать, что все параметры Пуассона, кроме a , равны нулю, то величина компоненты суммарного магнитного поля (СМП) определится из уравнения

$$X' = (1 + a)H \cos j + (1 + a) \sin j + P,$$

где H и Z — горизонтальная и вертикальная компоненты ГМП. Неизвестными являются постоянное поле P и составляющие индуцированной намагниченности $(1 + a)H$, $(1 + a)Z$. Для их вычисления необходимо провести три измерения СМП при различных значениях углов j и составить систему алгебраических уравнений. Ее решение позволит получить значения указанных неизвестных. Если определить отношение

$$I = \operatorname{arccotan} \frac{(1 + a)H}{(1 + a)Z},$$

то будет найдено направление вектора индукции ГМП. Полученное решение корректно и, что самое главное, не зависит от величины параметра a , т.е. ни от уровня собственного поля ФС, ни от его градиента.

Основываясь на изложенной методике, рассмотрим возможность определения направления вектора индукции ГМП на борту ферромагнитного носителя, совершающего произвольные колебания. Уравнение Пуассона для компоненты X' СМП имеет вид

$$\begin{aligned} X' = & (1 + a)H \cos j \cdot \cos k - (1 + a)Z \sin j + \\ & + bH \cos i \cdot \sin k + bH \sin j \cdot \sin i \cdot \cos k + \\ & + bZ \cos j \cdot \sin i + cZ \cos j \cdot \cos i - cH \sin i \cdot \sin k + \\ & + cH \sin j \cdot \cos i \cdot \cos k + P, \end{aligned}$$

где a, b, c — параметры Пуассона. После ряда одновременных измерений величины компоненты X' и углов i, j, k , характеризующих положение носителя в поперечной, продольной и горизонтальной плоскостях, соответственно, может быть составлена система алгебраических уравнений. Из нее вычисляются все неизвестные, которые являются составляющими собственного магнитного поля носителя. Определим следующие отношения (рис. 2):

$$I_{xz} = \operatorname{arccotan} \frac{(1 + a)H \cos k}{(1 + a)Z}, \quad I_{yz} = \operatorname{arccotan} \frac{bH \sin k}{bZ}.$$

Введя курсовую систему координат (плоскость xOy горизонтальна, ось x совпадает с вертикальной плоскостью, содержащей продольную ось носителя), можно увидеть, что углы I_{xz} и I_{yz} определяют в ней направление вектора индукции ГМП. Далее вычисляется магнитное наклонение I и магнитный курс K . Если по показаниям гироскопических приборов известен истинный курс, то определяется и магнитное склонение.

Установим условия возможности и единственности решения задачи. При реализации векторных измерений СМП на носителе будем использовать векторное уравнение Пуассона:

$$\mathbf{T}' = |\mathbf{R}| \cdot |\mathbf{S}| \mathbf{T} + \mathbf{T}_p, \quad (1)$$

где \mathbf{T}' — вектор индукции СМП; $|\mathbf{R}|$ — сумма единичной матрицы и матрицы параметров Пуассона; $|\mathbf{S}|$ — матрица, определяющая ориентацию носителя в заданной системе координат; \mathbf{T} — вектор индукции ГМП; \mathbf{T}_p — вектор индукции постоянного поля носителя. Решение системы векторных уравнений (1), составленной по результатам ряда измерений, осуществляется совместно с учетом условия нормировки: $T_m = 1$. Для проведения исследований наиболее целесообразно использовать разности уравнений (1):

$$\mathbf{V}_n = |\mathbf{R}| \cdot |\mathbf{G}_n| \mathbf{T},$$

где $\mathbf{V}_n = \mathbf{T}'_n - \mathbf{T}'_1$, $|\mathbf{G}_n| = |\mathbf{S}_n| - |\mathbf{S}_1|$, $n = 2, 3, \dots, N - 1$; N — количество измерений. В результате выполненных пяти независимых измерений и учитывая, что в трехмерном пространстве только три вектора \mathbf{V}_n линейно независимы, четвертый вектор \mathbf{V}_4 может быть вычислен как линейная комбинация трех остальных:

$$\mathbf{V}_4 = \sum_{i=1}^3 a_i \mathbf{V}_i, \quad (2)$$

где a_i — постоянные коэффициенты. Зависимость (2) сводится к векторному уравнению

$$|\mathbf{B}_n| \mathbf{T} = \mathbf{0},$$

где

$$|\mathbf{B}_n| = \sum_{i=1}^3 a_i |\mathbf{G}_i| - |\mathbf{G}_4|$$

— квадратная матрица 3×3 . В матрице каждая строка определяет три компоненты вектора $\mathbf{b}(l)$, где l — номер строки ($n = 1, 2, 3$). Выражение (2) адекватно трем скалярным произведениям:

$$(\mathbf{b}(1), \mathbf{T}) = 0, \quad (\mathbf{b}(2), \mathbf{T}) = 0, \quad (\mathbf{b}(3), \mathbf{T}) = 0.$$

Из них следует, что вектор \mathbf{T} ортогонален векторам $\mathbf{b}(l)$ и проходит через начало координат. Он лежит в трех плоскостях, каждая из которых перпендикулярна одному из векторов $\mathbf{b}(l)$. Если хотя бы два вектора $\mathbf{b}(1)$ и $\mathbf{b}(2)$ неколлинеарны, а это выполняется при переориентации носителя как минимум в двух взаимно ортогональных плоскостях, то вектор \mathbf{T} совпадает с линией пересечения плоскостей. В этом случае решение задачи единственно.

Изолинии магнитного поля земли

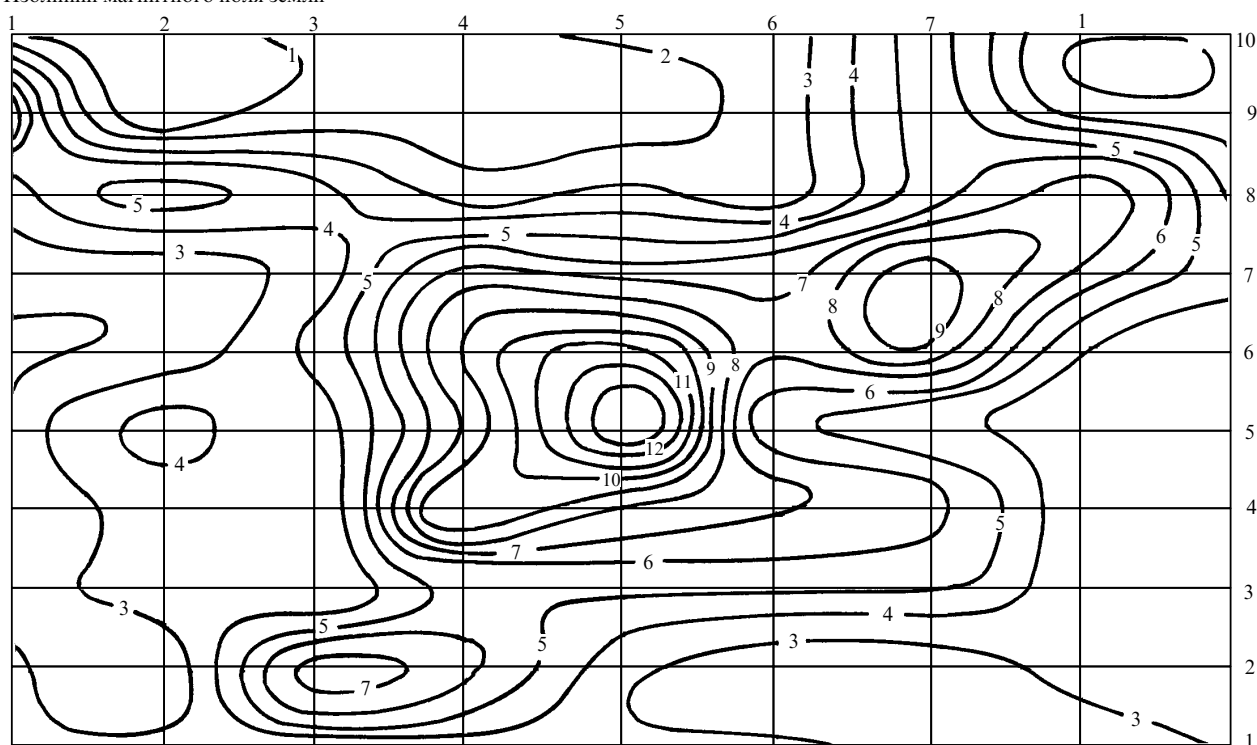


Рис. 3. Карта распределения модуля T ; соответствие между цифрами на карте и величинами поля (в нТл): 1 — 51 350, 2 — 51 450, 3 — 51 560, 4 — 51 660, 5 — 51 770, 6 — 51 870, 7 — 51 980, 8 — 52 080, 9 — 52 190, 10 — 52 290, 11 — 52 400, 12 — 52 500, 13 — 52 610

Для проверки основных физических принципов МОУК и возможности его реализации на носителе были проведены экспериментальные исследования в лабораторных условиях и на ферромагнитном судне.

Лабораторные исследования, проведенные на специально созданном макете, показали:

- МОУК позволяет определять УК вектора индукции ГМП по результатам измерений, проведенных в СМП;

- собственные поля ФМ принципиально не влияют на точность определения УК (установка ФМ, имеющих самые разные магнитные характеристики, осуществлялась на расстоянии 1–2 см от МЧП);

- МОУК позволяет определять составляющие собственного поля ФМ, образованные как постоянной, так и индуцированной намагниченностью;

- МОУК может быть реализован при переориентации измерительных систем в двух или в трех взаимно ортогональных плоскостях;

- переориентация измерительных систем должна осуществляться на углы, величины которых составляют 0,5 и более угловых градусов;

- МОУК может быть реализован по результатам магнитометрических измерений, осуществленных на любом расстоянии от ферромагнитных масс, имеющих практически любое по уровню и направлению собственное магнитное поле;

- измерения компонент СМП могут осуществляться практически в любом по неоднородности магнитном поле;

- среднеквадратическая погрешность определения УК по результатам измерений в ГМП и в СМП практически одна и та же и составляет 0,6–1,2 угл. мин.;

— разработанные алгоритмы решения плохо обусловленных систем уравнений обеспечивают возможность получения устойчивого решения.

Дальнейшие многократные исследования МОУК осуществлялись на ферромагнитном судне. Возможность проведения геомагнитных измерений с помощью МОУК была проверена по результатам измерений, проведенных во время стоянки судна на якоре, при выполнении им маршрутных и крупномасштабных площадных съемок. Была осуществлена также и площадная векторная съемка по следующей схеме: определение направления вектора индукции ГМП выполнено на борту судна, а измерения модуля — буксируемым прибором. Исследования проводились с помощью измерительно-вычислительного комплекса (ИВК), который при проверке в лабораторных условиях работал с точностью 4–6 угл. мин. Такой же результат был получен и на ферромагнитном судне, что говорит о существующей возможности повышения точности измерений при создании ИВК на базе использования более точных измерительных приборов. Распределение компонент ГМП, полученных на полигоне (карта магнитного склонения не была построена из-за низкой точности работы судового гирокомпас) по результатам измерений, выполненных на борту ферромагнитного судна, приведено на рис. 3–6.

Результаты исследований подтвердили возможность реализации МОУК на ферромагнитных носителях. Показано, что собственные поля ФМ судна практически не влияют на точность определения направления вектора индукции ГМП. Достигнутый в настоящее время уровень технологической проработки МОУК дает возможность перейти к созданию аппаратуры, предназначенной

Изолинии магнитного поля земли

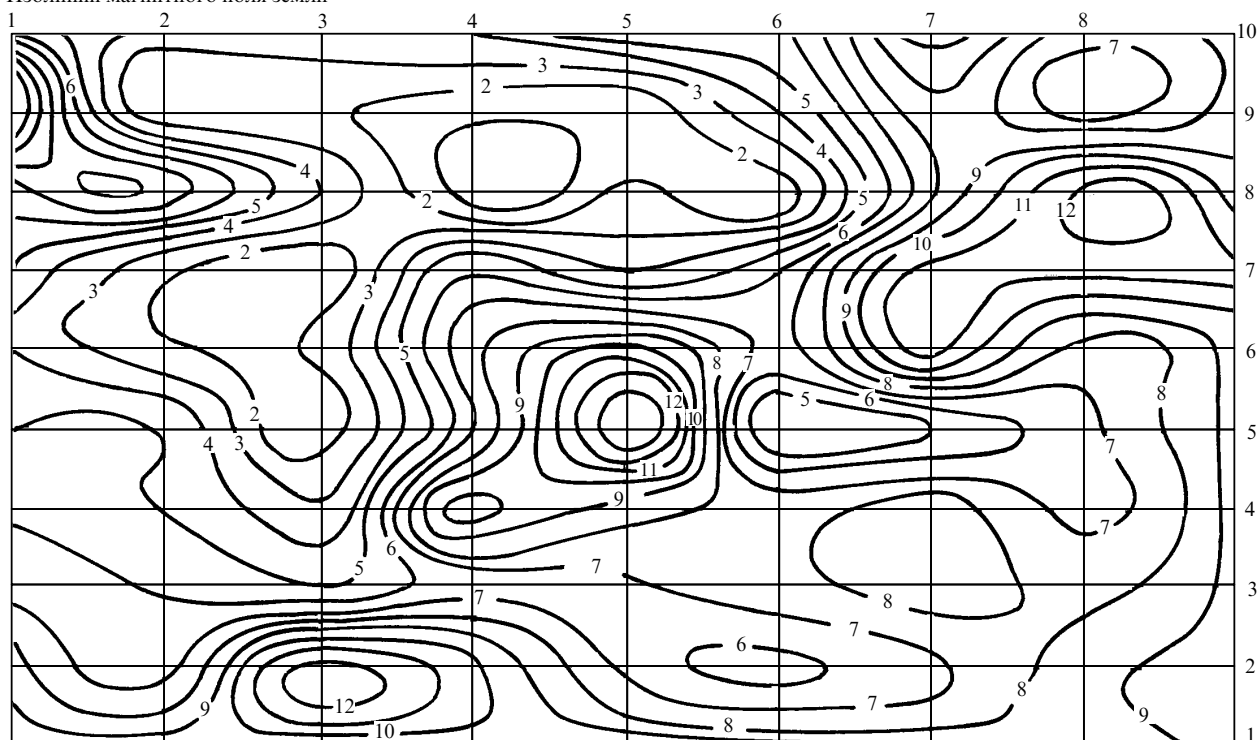


Рис. 4. Карта распределения магнитного наклонения I ; соответствие между цифрами на карте и значениями магнитного наклонения (в угл. градусах): 1 — 71,66, 2 — 71,78, 3 — 71,89, 4 — 72,00, 5 — 72,11, 6 — 72,22, 7 — 72,33, 8 — 72,44, 9 — 72,55, 10 — 72,66, 11 — 72,78, 12 — 72,89, 13 — 73,00

Изолинии магнитного поля земли

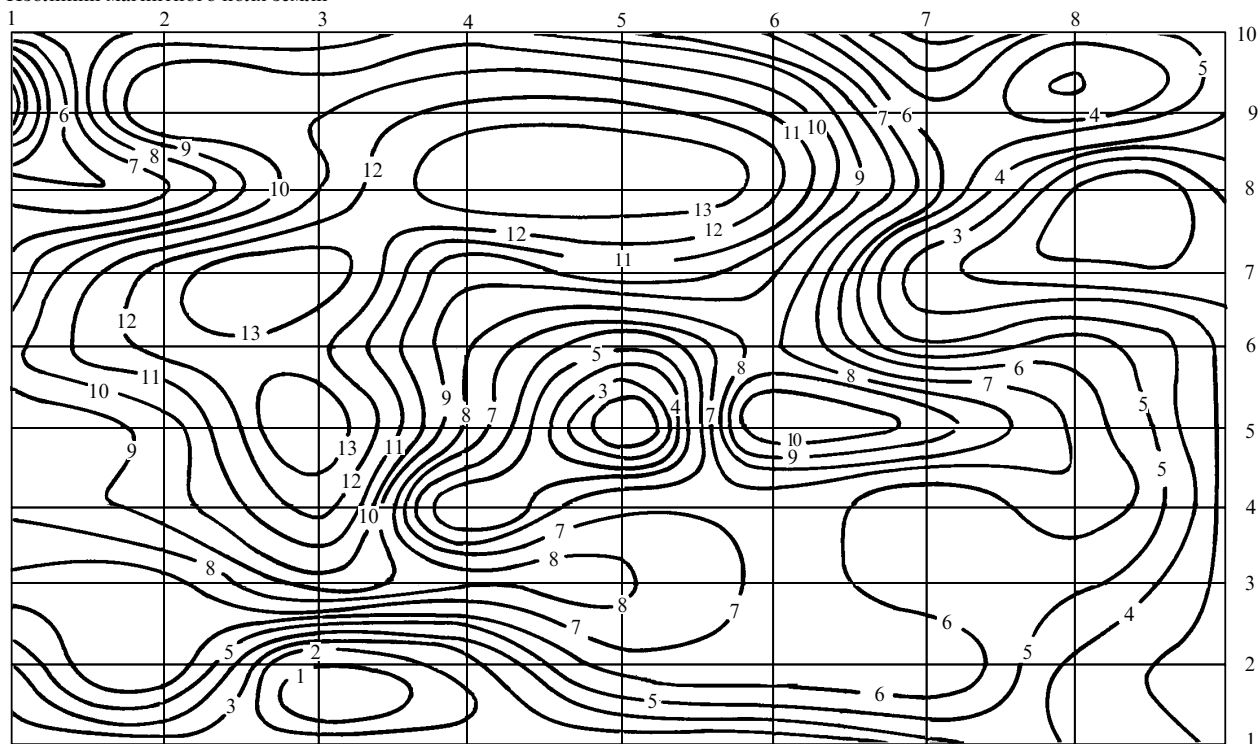


Рис. 5. Карта распределения компонента H ; соответствие между цифрами на карте и величинами компонент (в нТл): 1 — 15 290, 2 — 15 360, 3 — 15 430, 4 — 15 510, 5 — 15 580, 6 — 15 650, 7 — 15 720, 8 — 15 790, 9 — 15 860, 10 — 15 930, 11 — 16 010, 12 — 16 080, 13 — 16 150

Изолинии магнитного поля земли

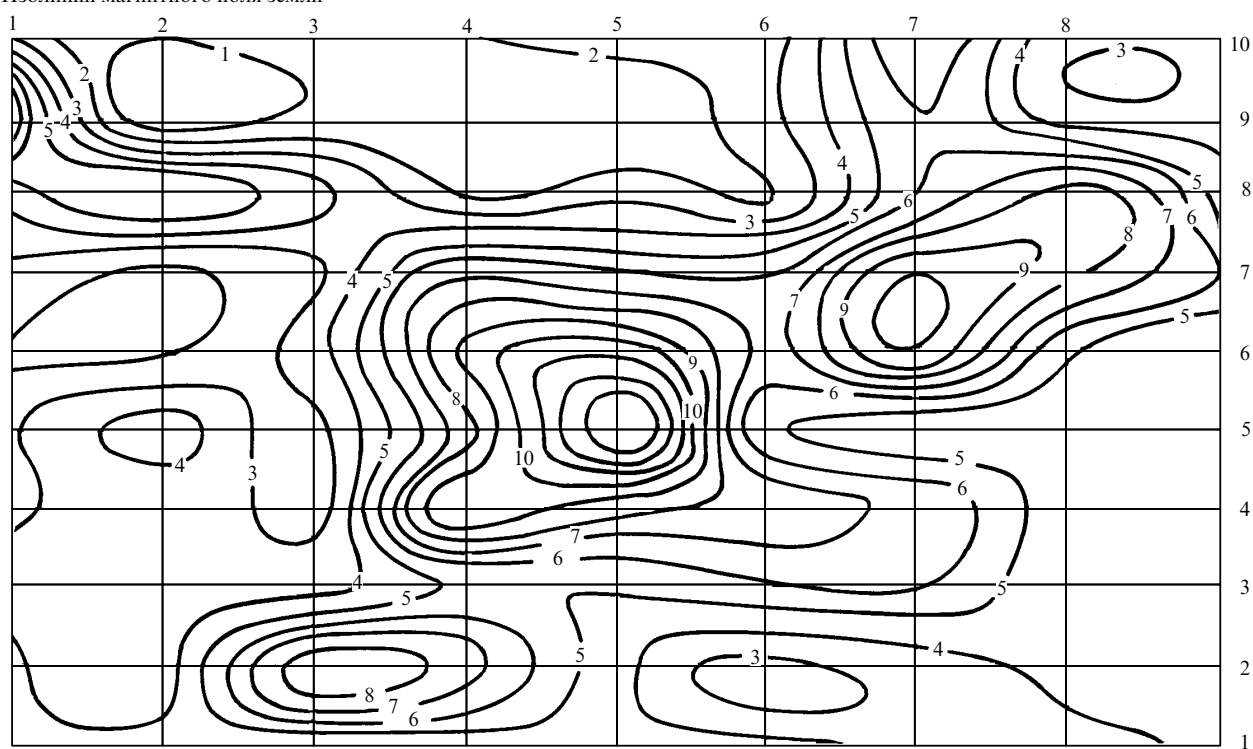


Рис. 6. Карта распределения компонента Z ; соответствие между цифрами на карте и величинами компонента (в нТл): 1 — 48 780, 2 — 48 910, 3 — 49 030, 4 — 49 160, 5 — 49 280, 6 — 49 410, 7 — 49 530, 8 — 49 660, 9 — 49 780, 10 — 49 910, 11 — 50 030, 12 — 50 160, 13 — 50 280

для решения геофизических и геологических задач различного вида, а также навигационных измерительных приборов и систем. Результаты проведенных исследований позволяют считать, что МОУК может быть реализован на носителях, движущихся не только на водной поверхности, но и в атмосфере, а также космическом пространстве. Так как корпус подобных носителей состоит из немагнитных и маломанитных сплавов, то упрощается технология измерений УК, и появляется возможность определения на борту модуля ГМП.

Список литературы

1. Бледнов В А Авт. св-во 854156 СССР. Способ определения направления вектора магнитной индукции геомагнитного поля Бледнова (1980)
2. Тихонов А Н, Арсенин В Я *Методы решения некорректных задач* (М.: Наука, 1986)
3. Крылов А Н *Основная теория девиации компаса*. Т. II. Компасное дело (М.; Д.: Морской транспорт, 1943) (Собр. трудов акад. А.Н. Крылова) с. 3
4. Бледнов В А Определение составляющих собственного магнитного поля носителя *Геомагнетизм и аэрономия* **22** (3) 483 (1982)