

Сравнительный анализ методов поиска источника магнитного поля дипольной модели

Ю. М. ИВАНОВ, В. Г. СЕМЁНОВ

АО «МЕРА», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: mera1@mail.wplus.net

Проведён детальный анализ погрешностей входных и выходных данных для нескольких экспресс-методов поиска источника магнитного поля. На примере конкретной измерительной ситуации с помощью компьютерного моделирования выведены сравнительные оценки точностей и предельных дальностей поиска. Рассмотрены вопросы масштабного моделирования поиска и приложения полученных результатов к произвольной измерительной ситуации.

Ключевые слова: дальность, магнитный момент, индукция, дифференциальный магнитометр.

A detailed error analysis of input and output data is carried out for several express-methods of magnetic search. For one specific measurement situation the comparative estimates of the search accuracy and the search range are obtained by computer simulation for all the methods. Some aspects of the scale search modeling, as applied to an arbitrary measurement situation, are reviewed.

Key words: range, magnetic moment, induction, differential magnetometer.

На небольшом участке Земли магнитное поле (МПЗ) можно считать однородным, т. е. независящим от пространственных координат. Малая часть МПЗ, изменяемая во времени, называется вариациями. Вариации МПЗ также однородны. Отдельные намагниченные объекты создают на фоне однородного МПЗ неоднородные магнитные поля. Источники таких магнитных аномалий часто становятся объектом поиска. В этом случае искомый источник аппроксимируют магнитным диполем, т. е. точкой с магнитным моментом (ММ). Различают задачи обнаружения, пеленгации и локализации магнитных аномалий. Обнаружение заключается в определении неоднородной части магнитного поля или в выявлении факта существования аномалии, пеленгация – в указании направления на неё, а локализация – в нахождении направления и расстояния до этой аномалии. Процесс локализации информативнее пеленгации, которая, в свою очередь, информативнее обнаружения.

Методы поиска источника магнитного поля дипольной модели. Рассмотрим различные методы поиска, погрешности и дальности которых сравним в последующих разделах.

Аналитические методы пеленгации и локализации. Впервые задача магнитной пеленгации была поставлена в 1963 г. В работе [1] предлагалось использовать градиент модуля индукции дипольного поля как приближённый индикатор направления на искомый источник с погрешностью не более 14°. На рис. 1 представлены измеренные в произвольно выбранной точке наблюдения параметры дипольного магнитного поля $\mathbf{B} = B\mathbf{b}$, где B – модуль; $\mathbf{b}$ – безразмерный единичный вектор или направление; ∇B – градиент модуля;

Точка наблюдения
 $\mathbf{B} = B\mathbf{b}$, ∇B , $\nabla \mathbf{B} = D$

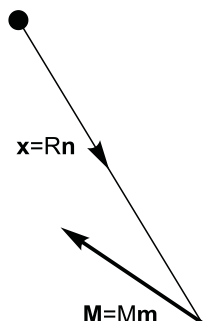


Рис. 1. Определение $\mathbf{x} = R\mathbf{n}$, $\mathbf{M} = M\mathbf{m}$ аналитическим методом поиска

$\nabla \mathbf{B} = D$ – градиент вектора. По этим параметрам вычисляются искомые неизвестные: $\mathbf{x} = R\mathbf{n}$, где R – расстояние до источника, $\mathbf{n}$ – направление на него, и его магнитный момент $\mathbf{M} = M\mathbf{m}$ (M – модуль магнитного момента (ММ), а $\mathbf{m}$ – его направление).

В 1975 г. был опубликован первый точный аналитический или явный метод пеленгации по градиенту вектора дипольной индукции D путём диагонализации матрицы D [2]. Этот метод позволял определять четыре направления, из которых без привлечения дополнительной информации нельзя было выбрать истинное $\mathbf{n}$. В 1988 г. выяснилось, что метод неустойчив при $\varphi = \cos(\mathbf{m}, \mathbf{n}) = \pm 1$.

В 1976 г. появилось сообщение о первом аналитическом методе локализации по градиенту D и вектору индукции диполя $\mathbf{B}$. Метод основывался на применении теоремы Эйлера для однородных функций к дипольной индукции, но оказался неустойчив при $\varphi = 0$ [3].

В 1980 г. в результате решения характеристического уравнения градиента D в общем виде относительно искомых векторов $\mathbf{n}$, $\mathbf{m}$ появился однозначный и устойчивый при всех φ метод локализации диполя и определения его магнитного момента [4]. Согласно этому методу

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x} &= R\mathbf{n} = 3(D + \lambda_1 I)\mathbf{B} / (\lambda_2 \lambda_3); \\ \mathbf{M} &= \frac{4\pi}{\mu_0} R^3 \left(\frac{3}{2} \mathbf{n}\mathbf{n}' - I \right) \mathbf{B}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($\lambda_3 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2$) – собственные числа D , вычисляемые стандартным способом по заданному (измеренному) градиенту D ; I – единичная матрица; $\mathbf{n}\mathbf{n}'$ – симметричная 3×3 матрица – результат произведения столбца $\mathbf{n}$ на строку $\mathbf{n}'$; $\mathbf{B}$ – измеренная индукция магнитного поля диполя.

Численные методы локализации. Задачу магнитного поиска можно решать и численными методами, но вычислительные центры долгое время были маломощны, неудобны и практически недоступны. Однако за последние два десятилетия современные и быстродействующие вычислительные средства стали доступны пользователям.

В этой связи был разработан ускоренный метод локализации, в котором все шесть неизвестных, а именно $\mathbf{x} = R\mathbf{n}$, $\mathbf{M} = M\mathbf{m}$ определялись численно по результатам измерений шести разностей индукции $\mathbf{B}_{i0} = \mathbf{B}_i - \mathbf{B}_0$ между точками 1–6, размещёнными на полуосях системы координат, и её центром 0 (рис. 2) [5]. Уравнение этого метода можно записать в виде

$$\mathbf{B}_{i0} = f_i(\mathbf{L}_i, \mathbf{x}, \mathbf{M}),$$

где $\mathbf{L}_i$ – вектор пары точек $i0$ или плеча $i0$.

Нормальным количеством считается шесть плеч, однако их может быть и меньше, и больше. Далее рассмотрим вариант с 14 плечами, в котором к плечам 10–60 в центрах граней (воображаемого) куба добавлены восемь плеч 70–140 датчиков, расположенных в вершинах этого куба. Длина плеча 10–60 равна L , а длина плеча 70–140 – $L\sqrt{3}$. На рис. 2 плечи 70–140 не показаны, чтобы не затемнять чертёж.

Рассматриваемые ниже методы поиска именуются, различаются и обозначаются кратко по виду уравнения или источнику публикации метода. Например, метод (1), или метод 5. Варианты метода 5 обозначаются дополнительным указанием количества плеч. Например, метод 5/2, метод 5/6, или метод 5/14.

Метод 5 и его варианты устраняют главный недостаток методов, изложенных в [3], [4]. Этот недостаток связан с измерением дипольной индукции $\mathbf{B}$ на фоне МПЗ. Далее при сравнении методов рассмотрим также *метод поиска по проходным характеристикам* (ПХ) с помощью системы модульных датчиков 4, 0, 3, показанных на рис. 3, где a , b – границы измеряемого участка ПХ с произвольно выбранным началом координат $0'$, штриховая линия – траверсное (неизвестное) состояние. Ниже этот метод именуется кратко методом ПХ.

Схема оценки погрешностей и предельных дальностей пеленгации (локализации). Предполагается, что в методе 5 используются трёхкомпонентные магнитометры, датчики которых размещены в соответствующих точках, изображённых на рис. 2. Эти магнитометры предназначены

для одновременного измерения разностей магнитной индукции между каждой периферийной точкой i и центром 0. Такие магнитометры называют дифференциальными. Они соединены с компьютером, с помощью которого полученные значения переводятся в цифровой код. Каждая дифференциальная пара передаёт информацию о векторе разности $\mathbf{B}_{i0}$ в компьютер. Измерения $\mathbf{B}_{i0}$ сопровождаются появлением инструментальных систематических и случайных погрешностей.

Систематические инструментальные погрешности и их коррекция. Как показано в [6], процессы, связанные с систематическими погрешностями трёхкомпонентного магнитометра, можно выразить следующим уравнением:

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{u}\mathbf{B} + \mathbf{O}, \quad (2)$$

где $\mathbf{B}_i$ – результат измерения; $\mathbf{B}$ – действительное значение вектора магнитной индукции; $\mathbf{O}$ – уход нулей магнитометра; $\mathbf{u}$ – матрица 3×3 , называемая искажающей матрицей, так как она искажает действительное значение вектора по величине и направлению.

Искажающая матрица учитывает систематические мультипликативные погрешности магнитометра. Источниками этих погрешностей (в рамках линейной модели преобразования) являются неточности коэффициентов преобразования и неортогональности магниточувствительных осей компонент. Уход нулей магнитометра представляет систематическую аддитивную составляющую погрешности. Искажающая матрица зависит от выбора системы координат, в которой рассматривается действительное значение вектора магнитной индукции. Результат измерений и уход нулей не зависят от системы координат, так как магнитометр «не знает», какая система выбрана для рассмотрения.

В [6] разработана методика определения искажающей матрицы с помощью трёхкомпонентной меры магнитной индукции в так называемой собственной ортогональной системе координат (СОСК) магнитометра. Особенность такой системы в том, что она ортогональна, даже если

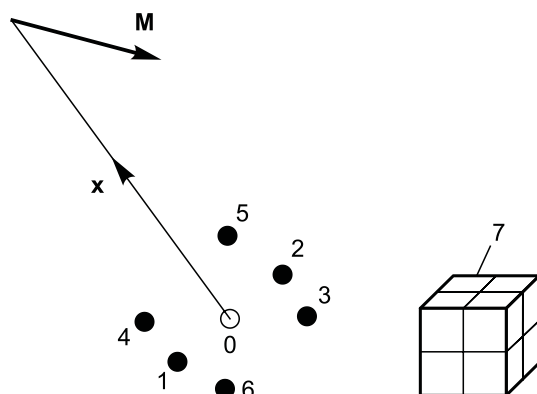


Рис. 2. Определение $\mathbf{x} = R\mathbf{n}$, $\mathbf{M} = M\mathbf{m}$ численным методом поиска: 0, 1–6 – трёхкомпонентные датчики; плечи дифференциальных включений датчиков 10–60; 7 – переносная трёхкомпонентная мера магнитного момента

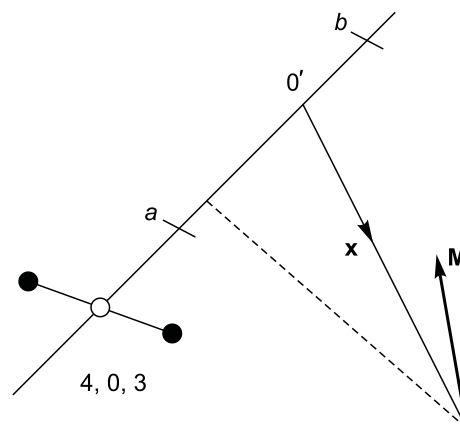


Рис. 3. Определение $\mathbf{x} = R\mathbf{n}$, $\mathbf{M} = M\mathbf{m}$ методом поиска по проходным характеристикам:

4, 0, 3 – модульные датчики; $0'$ – произвольно выбранное начало координат на оси проходной характеристики проекции разностей дипольной индукции 3–0 и 4–0 на направление магнитного поля Земли; a , b – границы участка проходной характеристики, выбранного для обработки

не ортогональны оси магнитометра. Концепция СОСК предложена в работе [7]. Если определить искажающую матрицу, то согласно (2) каждый последующий результат измерения можно исправить и тогда

$$k(\mathbf{B}_i - \mathbf{O}) = \mathbf{B}_i, \quad (3)$$

где $k = u^{-1}$ – корректирующая матрица данного магнитометра в его СОСК.

Возможность коррекции сохраняется и при движении магнитометра, так как СОСК магнитометра движется вместе с ним.

По аналогии с (3) применим метод корректирующих матриц к дифференциальному магнитометру $i0$, и запишем его скорректированное уравнение измерения в СОСК опорного магнитометра, т. е. в СОСК₀:

$$\mathbf{B}_{0(i0)} = \mathbf{B}_{0(i)} - \mathbf{B}_{0(0)} = s_{0i} \mathbf{B}_{i(i)} - \mathbf{B}_{0(0)} = s_{0i} k_i (\mathbf{B}_{i0} - \mathbf{O}_i) - k_0 (\mathbf{B}_{i0} - \mathbf{O}_0), \quad (4)$$

где s_{0i} – матрица ортогонального преобразования из СОСК_i в СОСК₀.

Остальные обозначения аналогичны (3), но индекс в скобках указывает на принадлежность к точке i или 0 , а индекс без скобки – на СОСК_i или СОСК₀. Например, $\mathbf{B}_{0(i0)}$ – скорректированная разность магнитной индукции точек $i, 0$ в СОСК₀, а $\mathbf{B}_{i(i)}$ – магнитной индукции точки i в СОСК_i.

Что касается матрицы s_{0i} , фигурирующей в выражении (4), то она определяется в однородном МПЗ с помощью ряда вспомогательных наклонов или поворотов всей системы датчиков. Отметим также, что с помощью переносной меры ММ (см. рис. 2, поз. 7) можно экспериментально моделировать поиск и контролировать его погрешности:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{R} &= \mathbf{x} - \mathbf{R}_{0M}, \\ \Delta \mathbf{M} &= \mathbf{M}_x - \mathbf{M}_M, \end{aligned}$$

где $\mathbf{x}$, $\mathbf{M}_x$ – результаты поиска; $\mathbf{R}_{0M}$ – результат непосредственного измерения радиус-вектора между центром меры и точкой 0 ; $\mathbf{M}_M$ – ММ меры.

Случайные инструментальные погрешности.

Эти погрешности определяются собственными шумами магнитометров, а также внешними однородными (и неоднородными) помехами, проникающими сквозь защитное дифференциальное включение. Пусть σ_B – среднее квадратическое отклонение (СКО) компоненты таких шумов и помех для однотипных магнитометров; $\sigma_B \sqrt{2}$ – СКО компоненты разности; $\sigma_B \sqrt{2}/l$ – СКО компоненты градиента, где l – база градиентометра.

Среднее квадратическое отклонение погреш-

ностей локализации по методу (1). Рассчитаем СКО локализации σ_x , используя приёмы из работы [8], и учтём все девять измеряемых компонент градиента дипольной индукции D .

Тогда

$$\sigma_x = \frac{4\pi R^5 \sigma_B}{3\mu_0 M l} \left[\frac{2(3\varphi^2 + 2) + 9(7\varphi^2 + 2)/R^2}{(1 + \varphi^2)} \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Среднее квадратическое отклонение локализации связано с СКО пеленгации σ_n соотношением

$$\sigma_x^2 = R^2 \sigma_n^2 + \sigma_R^2. \quad (6)$$

При p -кратном повторении и усреднении результатов измерения СКО среднего по сравнению с (5) будет снижаться как $\sigma_B / \sqrt{p}$. Обратим внимание, что СКО локализации (5) пропорционально пятой степени расстояния R , т. е. оно нарастает лавинообразно с увеличением R .

Средние квадратические отклонения погрешностей измерения ММ диполя. В работе [9] получено выражение для части СКО дипольного ММ σ_M в функции СКО погрешностей измерения радиус-вектора σ_R или σ_x в случае локализации по методу (1):

$$\frac{\sigma_M}{M} = 3 \frac{(7\varphi^2 + 5)^{1/2}}{2} \frac{\sigma_x}{R}. \quad (7)$$

Следовательно, значение σ_M/M пропорционально четвёртой степени расстояния и превышает значение σ_x/R в 3,4–5,2 раза в зависимости от $0 \leq \varphi^2 \leq 1$. Ожидается, что отмеченные в соотношениях (5), (7) тенденции должны проявляться во всех численных методах поиска источника дипольной модели.

Определение предельных расстояний поиска. Проверка методов осуществлена с помощью компьютерного моделирования (КМ) результатов измерений входных данных (с учётом погрешностей), обработки этих результатов, вычисления неизвестных (радиус-вектора $\mathbf{x}$, направления $\mathbf{n}$ и момента $\mathbf{M}$) с оценкой соответствующих погрешностей для каждого из сравниваемых методов.

С помощью пакета программ МАТЛАБ можно рассчитывать входные данные, добавлять к ним случайные величины с нулевым средним и заданным СКО, находить искомые неизвестные, многократно (до 1000 раз) повторять решение, вычислять СКО локализации, пеленгации и обнаружения σ_x , σ_n , $\sigma_{обн}$, а также оценки погрешностей средних Δ_x , Δ_n , $\Delta_{обн}$ и соответствующих граничных погрешностей при доверительной вероятности $P=0,997$:

$$\rho_x = 3\sigma_x + \Delta_x; \quad \rho_n = 3\sigma_n + \Delta_n; \quad \rho_{обн} = 3\sigma_{обн} + \Delta_{обн}. \quad (8)$$

Как отмечалось выше, оценки (8) должны зависеть от расстояния R . Условимся считать предельным расстоянием локализации, пеленгации или обнаружения то, при котором достигается заданная норма $c_{лок}$, $c_{пел}$, $c_{обн}$:

$$(\rho_x/R)_{пр} = c_{лок}; \quad (\rho_n)_{пр} = c_{пел}; \quad [\rho_{обн}/(B_{10} + B_{20} + \dots)]_{пр} = c_{обн}. \quad (9)$$

Выбор численного значения нормы (9) – это предмет соглашения. Например, схема на рис. 4 соответствует норме $c_{лок} = 0,5$.

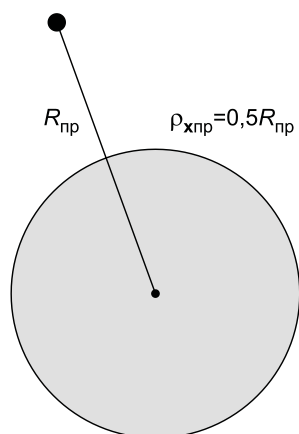


Рис. 4. Оценка предельного расстояния $R_{пр}$ и предельной погрешности $\rho_{хпр}$ локализации источника магнитного поля при норме $c_{лок} = 0,5$

Т а б л и ц а 1

Оценки погрешностей локализации r_x/R , r_m/M при $R = 4$ м

Методы	Класс аппаратуры	$\sigma_B = \sqrt{2} \cdot 10^{-10}$ Тл		$\sigma_B = \sqrt{2} \cdot 10^{-11}$ Тл	
		ρ_x / R	ρ_m / M	ρ_x / R	ρ_m / M
Аналитический метод (1), расчёт (6) / КМ, (8)	0	0,04/0,045	0,13	0,004/0,005	0,014
Численный метод 5/6 (плечи однокомпонентные)	0	–	–	0,24	0,96
Численный метод 5/2 (плечи 50–60 трёхкомпонентные)	0	0,15	0,55	0,015	0,052
	I	0,21	0,75	0,054	0,18
	II	0,69	3,2	0,510	2,2
Численный метод 5/6 (плечи трёхкомпонентные)	0	0,054	0,200	0,005	0,020
	I	0,065	0,240	0,014	0,047
	II	0,510	1,760	0,130	0,420
Численный метод 5/14 (плечи трёхкомпонентные)	0	0,016	0,061	0,002	0,006
	I	0,017	0,064	0,003	0,010
	II	0,028	0,100	0,013	0,043
Численный метод ПХ	0	–	–	0,008	0,030

Сравнение методов по погрешностям и предельным расстояниям. Летом 1989 г. в Летнем саду искали бомбу массой 250 кг. Она упала на территорию сада 8 сентября 1941 г., но не взорвалась, а ушла под землю предположительно на глубину 4–20 м. Бомбу так и не нашли. Центральная газета упрекнула поисковиков в «обескураживающем состоянии наших методик и технической оснащённости изысканий» [10]. Попробуем оценить предельные возможности рассмотренных методов магнитного поиска с помощью КМ.

Рассчитаем аналогичный случай поиска объекта с ММ, равным $12 \text{ А} \cdot \text{м}^2$. Пусть объект с постоянным ММ $\mathbf{M}=(M_1; M_2; M_3)=\mathbf{Mm}=12(0,2; 0,7; 0,686) \text{ А} \cdot \text{м}^2$ расположен в точке $\mathbf{x}=(x_1; x_2; x_3)=R\mathbf{n}=R[-0,24; 0,17; (1-0,24^2-0,17^2)^{1/2}]$ м в МПЗ (22000; 2000; 49000) нТл. Среднее квадратическое отклонение вариаций МПЗ примем равным 1 нТл. Для каждого метода с помощью КМ определим неизвестные радиус-вектор $\mathbf{x}$ и момент $\mathbf{M}$, а также их результирующие погрешности ρ_x, ρ_m .

В табл. 1 представлены оценки относительных погрешностей $\rho_x/R, \rho_m/M$ при расстоянии $R=4$ м. В табл. 2 приведены предельные дальности локализации, пеленгации и обнаружения в одних и тех же условиях и при одинаковой норме (9) $c_{\text{лок}}=c_{\text{пел}}=c_{\text{обн}}=c=0,75$.

Для расчёта выбраны следующие исходные данные: база дифференциальных магнитометров 10...60 (см. рис. 2); $L=0,75$ м; СКО собственных шумов и внешних помех на компонент дифференциального магнитометра $\sigma_B = \sqrt{2} \cdot 10^{-10}$ Тл. В режиме кратных измерений с усреднением входных данных, а также для модульных магнитометров $\sigma_B = \sqrt{2} \cdot 10^{-11}$ Тл.

В столбцах табл. 1, 2 показано влияние случайных инструментальных погрешностей, а в строках проиллюстрирована роль классов точности аппаратуры (дифференциальных магнитометров), обозначенных как

0, I, II. Эти классы учитывают уровни коррекции систематических инструментальных погрешностей. При этом 0 соответствует идеальной коррекции (действуют только случайные погрешности), в классе I систематические погрешности частично скорректированы, а в классе II – не скорректированы. Класс II соответствует нормам остатков искажающих матриц $|u_i, -l| \sim 0,01$ и нормам погрешностей поправок на уходы нулей, равных 1 нТл (обычные рабочие магнитометры с погрешностью около 1 %). Класс I соответствует нормам остатков скорректированных искажающих матриц $|ku_i, -l| \sim 0,001$ и нормам остатков коррекции уходов нулей, соответствующих 0,1 нТл.

В методе ПХ (см. рис. 3) для расчётов использована 51 точка участка этих характеристик с пределами $a, b=\pm 10$ м относительно начала координат 0', выбираемого произвольно в районе максимума ПХ. Обратим особое внимание, что данные табл. 1, 2 повторяют характерные тенденции соотношений (5), (7).

Предельная дальность обнаружения, как правило, превышает дальность пеленгации, а последняя – дальность локализации. Иногда это правило нарушается (см. табл. 2, строки I, II для метода 5/14). Нарушение объясняется сильным влиянием погрешностей от ухода нулей, которые так же как случайные погрешности (5) зависят от расстояния R , но не снижаются при усреднении входных данных из-за своего систематического характера.

В табл. 1, 2 включены расчёты для двух модульных методов поиска. Учтена потенциально высокая точность и стабильность модульных магнитометров, снижаемая только внешними помехами и пуассоновской матрицей носителя магнитометра, которая, как показано в работе [6], аналогична искажающей матрице компонентного магнитометра. Однако шесть однокомпонентных плеч, имитирующих модульные магнитометры в классе 0, уступают двум трёхкомпонентным плечам класса I по всем показателям, кроме обнаружения.

Т а б л и ц а 2

Оценки предельных дальностей локализации, пеленгации, обнаружения при норме $c=0,75$

Метод	Класс аппаратуры	$\sigma_B = \sqrt{2} \cdot 10^{-10}$ Тл			$\sigma_B = \sqrt{2} \cdot 10^{-11}$ Тл		
		Локализация	Пеленгация	Обнаружение	Локализация	Пеленгация	Обнаружение
Аналитический метод (1), расчёт (6)/КМ	0	9,2/8,3	–	–	16,5/15,0	–	–
Численный метод 5/6 (плечи однокомпонентные)	0	–	–	–	6,67	6,7	19,1
Численный метод 5/2 (плечи 50– 60 трёхкомпонентные)	0	5,5	5,6	8,9	8,8	8,9	15,7
	I	5,2	5,3	8,4	6,6	6,8	11,4
	II	4,1	4,2	6,4	4,6	4,7	6,9
Численный метод 5/6 (плечи трёхкомпонентные)	0	7,0	8,1	10,7	11,60	13,8	19,1
	I	6,4	7,1	9,9	7,7	7,8	12,9
	II	5,0	5,2	7,3	6,7	7,1	7,7
Численный метод 5/14 (плечи трёхкомпонентные)	0	8,8	10,0	11,4	14,5	16,9	20,3
	I	8,4	9,5	10,4	14,3	14,4	13,5
	II	8,6	8,7	7,6	9,8	9,9	7,9
Численный метод ПХ	0	–	–	–	11,9	12,6	13,8

Также метод ПХ уступает методу 5/14 по всем показателям, особенно в быстродействии. Время вычислений для метода ПХ составляет 1–2,5 с (без учёта времени сбора ПХ, в то время как для метода 5/14 – около 100–250 мс, а для аналитического метода (1) – приблизительно 0,1–0,2 мс. Такие данные, по-видимому, являются следствием малой информативности модуля. Ведь модуль – это утраченная информация о векторе. Объём и характер входной информации оказались недостаточными для локализации и пеленгации этими модульными методами.

Масштабное моделирование погрешностей магнитного поиска. Предприятие, специализирующееся в разработке систем поиска, опубликовало следующие данные по локализации [11]: дальность $R=900$ м; погрешность локализации $\rho_x/R=0,22$; погрешность определения ММ $\rho_m/M=0,2$. В публикации не указан размер ММ, который удалось выяснить позже: $M=200$ кАм². Сравним данные из [11] с данными табл. 1, 2 для метода 5/14 в классе 0. Воспользуемся принципом подобия и определим масштабный коэффициент моделирования $k = \sqrt[3]{M/12}$. Для подобного источника с размером M относительные погрешности, указанные в табл. 1, сохранятся, но при другом расстоянии $R=4k$ и другой базе, $L=0,75k$ соответственно в k раз

увеличатся предельные дальности, указанные в табл. 2. Увеличенные значения дальности приведены в первой строке табл. 3. Полужирным шрифтом выделены данные из [11]. Оценки представлены в функции расстояния: 370 – предельная дальность локализации методом 5/14; 275 – расстояние, при котором погрешность локализации данным методом снижается до 0,22; 205 – расстояние, когда погрешность измерения ММ методом 5/14 снижается до 0,21. В последней строке добавлены оценки соответствующих погрешностей по аналитическим выражениям (5), (7). Последние удовлетворительно согласуются с соответствующими КМ-оценками при $R \leq 370$ м, но при $R=900$ м опровергают погрешности [11] как чрезмерно заниженные. Фактически они опровергают само расстояние 900 м как чрезмерно завышенное. Кроме того, оценки 0,22 и 0,21 почти равны друг другу, чего в действительности быть не может. Согласно (7), погрешность ρ_m/M должна превышать ρ_x/R почти в четыре раза (при заданном $\varphi=0,73$).

В натуральных условиях экспериментальная проверка точностей и предельных дальностей магнитного поиска затруднительна из-за больших размеров источника, морской среды и неизвестности действительного значения ММ источника. Однако применяя принцип подобия, эти показатели можно определять экспериментально на аттестованных модельных стендах малых размеров с применением малогабаритных переносных трёхкомпонентных мер ММ.

Выше отмечалась целесообразность выбора $R < R_{пр}$ для повышения точности локализации магнитного диполя. Однако с уменьшением R нарушается дипольная модель, особенно для тел удлинённой формы, что приводит к появлению дополнительной погрешности от недипольности. Обозначим допустимый промежуток поиска $R_{нд} < R < R_{пр}$, где нижняя граница $R_{нд}$ определяется

Т а б л и ц а 3

Анализ данных, представленных в [11]

Параметр	ρ_x/R				ρ_m/M			
	$R, \text{ м}$				$R, \text{ м}$			
	900	370	275	205	900	370	275	205
Данные [11]	0,22	–	–	–	0,2	–	–	–
Метод (5)/14	–	0,75	0,22	0,05	–	3,90	0,93	0,21
Расчёт по (6), (8)	21	0,63	0,20	0,06	94	2,8	0,89	0,28

недипольностью искомого тела. Эта граница зависит от длины тела l_0 и выбора точки наблюдения. Например, $R_{нд} \approx 0,9l_0$, если точка наблюдения выбрана на оси тела и $R_{нд} \approx 0,3l_0$, если точка выбрана в плоскости центра тела поперек его оси.

Обсуждение результатов. Настоящая работа является запоздалым ответом на критику центральной газеты [10] по поводу результатов поиска бомбы в Летнем саду в 1989 г. Дело не в том, что критика справедлива, а в том, что её можно и сейчас адресовать многим ответственным областям отечественной специальной магнитометрии, где по-прежнему пренебрегают должным обоснованием оценок погрешностей ожидаемого результата измерения (см. табл. 3).

Статья посвящена обоснованию методов магнитного поиска через оценки точностей и предельных дальностей поиска. Проведено сравнение этих оценок для аналитического метода (1) с вариантами численного метода 5 и методом ПХ. Лучшим по точности и предельной дальности оказался метод 5/14. Все варианты метода 5, в отличие от методов (1) и метода ПХ, пригодны для измерений и в статике, и в движении.

Для повышения качества и достоверности магнитного поиска следует организовать контроль его точностей и дальностей, а также обратить внимание на разработку и совершенствование оперативных методов калибровки дифференциальных магнитометров и малогабаритных модельных стендов магнитного поиска, снабжённых трёхкомпонентными мерами ММ.

Л и т е р а т у р а

1. **Хвостов О. П.** Магнитный пеленгатор // Геофизическое приборостроение. Л.: 1963. № 15. С. 3–11.
2. **Wynn W. M., Frahm C. P., Carroll P. J., Clark R. H., Well-**

honer J., Wynn M. J. Advanced Gradiometer Magnetometer Arrays and a Novel Signal Processing Technique // IEEE Trans. Magnetics. 1975. V. Mag-11. No. 2. P. 701–707.

3. **Kolbenheyer T.** Príspěvok krieseniu obratenej ulohy predipol // Banický listy. 1976. No. 4. P. 31–35.

4. **Семёнов В. Г.** Решение обратной задачи для источника физического поля дипольной или квадрупольной модели // Методы и средства точных магнитных измерений / Сб. трудов НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». 1980. С. 3–19.

5. **Пат. 2521134 РФ.** Способ локализации источника магнитного поля дипольной модели / Ю. М. Иванов, В. Г. Семенов // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 18.

6. **Иванов Ю. М., Семёнов В. Г.** Корректирующие матрицы – путь к повышению точности трехкомпонентных магнитометров // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 46–51.

7. **Merrayo J. M. J.** Scalar calibration of vector magnetometers // Meas. Sci. Technol. 2000. V. 11. P. 120–132.

8. **Семёнов В. Г., Зайончковский А. Я.** Сравнительный анализ градиентных методов локализации источников магнитного поля дипольной модели. // Создание средств измерений для метрологического обеспечения прецизионных нанотесламетров. Сб. трудов НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». 1988. С. 56–67.

9. **Семёнов В. Г., Сони́на В. Э.** Анализ методов измерения магнитных моментов // Метрология. 1992. № 8. С. 3–46.

10. **Герасимов В.** Бомба не найдена // Газета «Правда» от 28.08.1989.

11. **Магнитометрическая система.** [Офиц. сайт] http://www.radar-mms.com/Product.aspx?product_10_1 (дата обращения 20.07.2016).

Дата принятия: 28.09.2016.