

Возмущения в динамике и погрешности измерений могут быть учтены при построении наблюдателей и соотношений паритета, которые должны обладать робастными свойствами по отношению к дестабилизирующим факторам. Эти вопросы детально рассмотрены в работах [2, 5].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Мироновский Л. А.* Функциональное диагностирование динамических систем. — М.: СПб.: МГУ-ГРИФ, 1998. — 256 с.
2. *Frank P. M.* Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowl-

edge-based redundancy — a survey and some new results. // *Automatica*. — 1990. — V. 26. — P. 459–474.

3. *Жирабок А. Н.* Поиск дефектов в нелинейных системах методом функционального диагностирования на основе обобщенных алгебраических инвариантов // *Автоматика и телемеханика*. — 1994. — № 7. — С. 160–169.
4. *Жирабок А. Н., Усольцев С. А.* Линеинные методы при диагностировании нелинейных систем // *Автоматика и телемеханика*. — 2000. — № 7. — С. 149–159.
5. *Шумский А. Е.* Функциональное диагностирование динамических систем в условиях параметрической неопределенности модели // *Автоматика и телемеханика*. — 1994. — № 3. — С. 184–188.
6. *Жирабок А. Н.* Функциональное диагностирование на основе соот-

ношений паритета // *Автоматика и телемеханика*. — 1998. — № 2. — С. 133–143.

7. *Жирабок А. Н., Шумский А. Е.* Диагностирование нелинейных динамических систем: адаптивные соотношения паритета // *Автоматика и телемеханика*. — 2002. — № 11. — С. 138–150.

*Алексей Нилович Жирабок — д-р техн. наук, профессор Дальневосточного государственного технического университета;*

*Антон Михайлович Писарец — вед. специалист ЗАО “Мобиком-Хабаровск”;*

*Александр Сергеевич Якшин — аспирант Дальневосточного государственного технического университета.*

☎ (4232) 45-08-64

E-mail: zhirabok@mail.ru

□

УДК 550.814

## СИСТЕМА АЭРОМАГНИТНОЙ СЪЕМКИ АНОМАЛИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

**А. К. Волковицкий, Е. В. Каршаков, М. В. Харичкин**

Описан новый метод обработки магнитных измерений, полученных с самолета-носителя. Классическая модель магнитных помех дополнена стохастической моделью аномального магнитного поля Земли. Приведены результаты численной обработки реальных данных.

Магнитный метод геофизической разведки используется для изучения платформенного фундамента, прослеживания тектонических нарушений, поиска рудных месторождений и т. д. Такой метод основан на построении карт аномалий модуля магнитного поля Земли, численной обработке измерений и геологической интерпретации полученных результатов. Для построения карт применяются измерения магнитного поля на борту летательного аппарата, совершающего площадную съемку территории.

В современных аэромагнитных системах используются два типа датчиков: квантовый магнитометр, измеряющий скалярную величину модуля магнитного поля  $B$  с точностью  $0,1...0,2$  нТл,

и феррозондовый магнитометр, измеряющий компоненты вектора магнитного поля  $B_F$  с точностью  $15...20$  нТл [5].

Квантовый датчик работает на эффекте Зеемана — появлении под воздействием магнитного поля дополнительных спектральных линий атомов с частотой излучения или поглощения, пропорциональной величине модуля магнитного поля. Наиболее распространены цезиевые датчики производства “Геологоразведка”, “Дальприбор” (Россия) и фирм “Scintrex”, “Geometrics” (Канада). Линия цезия, на которой они работают, соответствует частоте порядка  $100$  кГц, она довольно широкая, что облегчает стабилизацию сигнала, но ухудшает его точ-

ность. Такие датчики производятся уже не один десяток лет.

Развитие элементной базы привело к появлению другого типа квантовых датчиков, доступных для промышленного использования, — так называемых СТС магнитометров со сверхтонкой структурой линии [1]. Характер линии поглощения позволяет существенно повысить качество измерений.

В настоящее время требования к точности данных аэромагнитной съемки при построении карт масштаба  $1 : 5000$  составляют  $10^{-5}$  от величины поля.

При проведении магнитных съемок с использованием подвижных носителей (самолета или вертолета) на показания датчика искажающее влияние оказывает поле носителя.

Одним из решений по устранению поля является установка датчика магнитометра в гондоле, буксируемой за летательным аппаратом на трос-кабеле длиной 30 м и более. При таком удалении требуется только компенсация небольшого влияния самой гондолы. Этот метод активно применяют ГНПП "Аэрогеофизика" и другие российские предприятия. Установка в гондолу навигационного оборудования GPS позволяет проводить съемки масштаба 1 : 5000 с использованием в качестве носителей и самолетов, и вертолетов. Однако такой подход налагает значительные ограничения на условия пилотирования и влияет на безопасность полетов.

Другое решение — компенсация влияния магнитных свойств летательного аппарата на показания датчика, установленного на специальной штанге — стингере. Многие западные заказчики требуют именно такого крепления квантового датчика магнитного поля.

Ранее в аэрогеофизической магнитной съемке применялась так называемая физическая компенсация — установка на борту источников поля, настраиваемых для минимизации наведенных помех до 1...2 нТл [2]. Для реализации другого подхода — вычисления нужной поправки — имеется несколько коммерческих программ. Наиболее известны программы канадских компаний "Pico Envirotec" и "RMS Instruments" [3] и российский аналог, разработанный во ФГУ НПП "Геологоразведка" [4]. Все они используются в системах с обычными цезиевыми квантовыми датчиками.

Предлагается новый метод компенсации влияния магнитной помехи, создаваемой самолетом-носителем при аэромагнитной съемке для построения карт аномалии магнитного поля. Особенности этого метода — введение стохастической модели аномалии магнитного поля Земли и получение стандартной

постановки задачи оценивания для решения методом Калмановской фильтрации [7].

Вектор суммарной магнитной помехи  $\Delta B_{sum}$ , действующей на магнитометр при произвольной эволюции самолета в пространстве, может быть представлен выражением:  $\Delta B_{sum} = \Delta B_m + \Delta B_i + \Delta B_{or} + \Delta B_e + \Delta B_V$ , где  $\Delta B_m$ ,  $\Delta B_i$  — соответственно помехи, создаваемые "магнитными массами", и помехи, создаваемые полем вихревых токов;  $\Delta B_{or}$  — ориентационная помеха, т. е. погрешность датчика магнитометра в зависимости от его ориентации;  $\Delta B_e$  — помехи от электрооборудования;  $\Delta B_V$  — вариационные помехи, связанные с суточными вариациями магнитного поля Земли. Для вертолета в модель входят также помехи вращающихся элементов — несущего и рулевого винтов, приводов и т. п.

Математическое выражение для помехи  $\Delta B_m$ , полученное Пуассоном, имеет вид [4, 6]:  $\Delta B_m = K + LB$ . Здесь  $B$  — вектор внешнего магнитного поля;  $K$  — вектор жесткой компоненты помехи, обусловленной полем магнитожестких материалов (их магнитный момент постоянен);  $L$  — тензор мягкой компоненты помехи, обусловленной полем магнитомягких материалов.

Поле индукционных токов  $\Delta B_i$  возникает от вариаций во времени магнитного поля при неравномерных движениях носителя или при его движении в области с большими горизонтальными или вертикальными градиентами магнитного поля Земли [4]:  $\Delta B_i = MB'$ , где  $B'$  — производная по времени вектора внешнего поля,  $M$  — матрица влияния вихревых токов.

Помехи от электрооборудования  $\Delta B_e$ , создаваемые магнитным полем токов, протекающих в электрических цепях носителя, по своим свойствам подобны жесткой компоненте  $K$  поля магнитных масс и зависят от

режимов работы электрооборудования, что приводит к нестабильности во времени. Это весомая компонента, для которой существуют свои методики списания [4].

Влияние ориентационных помех  $\Delta B_{or}$  зависит как от внешних факторов (температура и т. п.), так и от параметров движения носителя. Некоторые ее части списываются жесткими и мягкими компонентами  $\Delta B_m$ , но в целом характер этих помех не изучен. Величина данной погрешности во многом определяет конечную точность измерений. В новых датчиках эта погрешность должна стать существенно меньше.

Вариационные помехи  $\Delta B_V$  могут быть скомпенсированы показаниями магнитовариационных (базовых) станций, т. е. неподвижных датчиков магнитного поля, установленных в районе проведения работ [5].

Методика списания девиации требует проведения калибровочного полета для определения параметров магнитных помех (девиации), что предполагает подъем летательного аппарата на максимальную высоту ( $h \sim 1000$  м) для минимизации влияния аномального магнитного поля Земли. При этом амплитуда аномалии может составить не одну сотню нанотесла, однако ее характерная длина составляет несколько километров, что позволяет отличить ее от изменений магнитного поля, связанных с эволюциями летательного аппарата. На этой высоте совершается ряд эволюций с углами  $\sim 5^\circ$  по рысканию, крену и тангажу на четырех существенно различных курсах, необходимых для изменения ориентации вектора магнитного поля Земли относительно носителя. Для измерения этих эволюций применяется трехкомпонентный феррозондовый датчик магнитного поля, также установленный на стингере. Далее, после определения параметров помех, возможно проведение

магнитной съемки на рабочей высоте  $h$  около 100 м (см. рекомендации к программе компенсации канадской компании "Pico Envirotec").

Накопленный в ГНПП "Аэрогеофизика" опыт позволяет задаться характерными значениями параметров девиации для распространенных носителей (Ан-2, Ан-26, Cessna Grand Caravan, Ми-2) и произвести нормализацию модели магнитных помех и ее упрощение.

Приведем характерные значения основных параметров задачи для максимальной и рабочей высоты:  $B$  — значение поля в точке крепления датчика;  $B_* \sim 50000$  нТл — характерное значение поля;  $B_0$  — величина магнитного поля Земли в этой точке;  $\Delta B_m \sim 5$  нТл;  $\Delta B_i \sim 0,5$  нТл;  $\nabla B$  — величина градиентов магнитного поля;  $\nabla B \sim 1$  нТл/м при  $h \sim 100$  м;  $\nabla B \sim 0,01$  нТл/м при  $h \sim 1000$  м. Скорость для съемочной авиации  $v_* \sim 50$  м/с. Исходя из этих значений и переходя к выражению для модуля магнитного поля, можно получить нормализованную скалярную модель девиации магнитометра в разложении по малому параметру  $\varepsilon \sim 0,1$  (для максимальной высоты):

$$B = B_0 + \varepsilon^3 e_F^T K_* + 0,5\varepsilon^3 B_* e_F^T L_{*S} e_F + \varepsilon^4 B_* e_F^T M_* e_F + \varepsilon^6 C_0 + \bar{o}(\varepsilon^6), \quad (1)$$

где  $L_{*S} = L_* + L_*^T$  — симметричная матрица;  $e_F$  — единичный вектор феррозондового магнитометра;  $C_0$  — скалярная константа.

Отметим, что для рабочей высоты в скалярной модели девиации добавляется еще один член  $kB'$ , связанный с производной по времени модуля внешнего поля  $B'$ , обусловленной сравнительно большим градиентом. Его влияние при калиб-

ровочном полете невозможно учесть в силу малости, но на рабочих высотах оно становится существенно (т. е. его величина попадает в зону  $\varepsilon^6$ ). Таким образом, в отдельных случаях для повышения точности компенсации необходимо произвести оценку дополнительного скалярного параметра  $k$ , обработав точки пересечения основных съемочных маршрутов с так называемыми опорными маршрутами, которые выполняются с большим межмаршрутным расстоянием в направлении, перпендикулярном направлению основной съемки.

Из уравнения (1) следует, что с точностью до  $\varepsilon^6$  (т. е.  $10^{-6}$ ) включительно справедливо приближенное уравнение для скалярной модели девиации:

$$B = B_0 + e_F^T K + e_F^T L_S e_F + e_F^T M e_F + C, \quad (2)$$

где  $K = (K_i) = \varepsilon^3 K_*$ ;  $L_S = (L_{ij}) = 0,5\varepsilon^3 B_* L_{*S}$ ;  $M = (M_{ij}) = \varepsilon^4 B_* M_*$ ;  $C = \varepsilon^6 C_0$ ;  $i, j$  — принимают значения от 1 до 3.

Можно показать, что модель магнитных помех содержит 16 наблюдаемых параметров:  $K_1, K_2, K_3, L_{11}, L_{12}, L_{13}, L_{22}, L_{23}, M_{11}, M_{12}, M_{13}, M_{21}, M_{22}, M_{23}, M_{31}, M_{32}$ . Оставшиеся параметры матриц  $L_S, M$  будут зависеть от них в силу симметричности матрицы  $L_S$  и тождеств  $e_F^T e_F' \equiv 0, e_F^T e_F \equiv 1$ .

Для получения замкнутой модели оценивания необходимо дополнить скалярное уравнение измерений (2) дифференциальными уравнениями, описывающими компоненты аномального магнитного поля и параметров девиации. В нашей постановке задачи параметры девиации  $K, L, M$  полагаются постоянными. Для описания поля вводятся следующие формирующие уравнения:

$$B_0 = B(x, y, h_0) + B_h(h - h_0); \\ B(x, y, h_0)' = vB_x;$$

$$B_h' = vB_{hx}; \quad B_x' = vB_{xx}; \\ B_{hx}' = vq_2; \quad B_{xx}' = vq_1. \quad (3)$$

Здесь  $x, y, h$  — декартовы координаты точки измерения магнитного поля; горизонтальная скорость  $v$  вычисляется как  $v = x'$ ; изменения  $y$  по нашему опыту пренебрежимо малы; нижним индексом  $x$  или  $h$  обозначены частные производные по этим переменным;  $h \sim h_0 \sim 1000$  м;  $h - h_0 \sim 50$  м;  $q_1, q_2$  — белый шум, параметры которого выбираются, исходя из характерных величин аномального поля и его градиентов, их среднеквадратичные отклонения  $\sigma_1 = \sigma_2 = 10^{-6}$  нТл/м<sup>3</sup>.

Используя предположение о постоянстве параметров девиации, а также скалярное уравнение измерений (2) и формирующие уравнения (3), получаем замкнутую задачу оценивания для вектора состояния  $X$  по измерениям  $Z$ :

$$X = (K_1, K_2, K_3, L_{11}, L_{12}, L_{13}, L_{22}, L_{23}, M_{11}, M_{12}, M_{13}, M_{21}, M_{22}, M_{23}, M_{31}, M_{32}, B, B_x, B_{xx}, B_h, B_{hx})^T,$$

$$K_i' = 0; \quad L_{ij}' = 0; \quad M_{ij}' = 0; \\ B' = vB_x; \quad B_x' = vB_{xx}; \quad B_{xx}' = vq_1;$$

$$B_h' = vB_{hx}; \quad B_{hx}' = vq_2;$$

$$Z = B + B_h(h - h_0) + \sum_i e_i K_i + \sum_i \sum_j e_i e_j L_{ij} + \sum_i \sum_j e_i e_j M_{ij}; \quad (4)$$

$v, h$  — определяются по информации от GPS-приемника;  $e_i$  — находятся по показаниям феррозондового датчика;  $q_1, q_2$  — моделируются белым шумом;  $\sum_{i(j)}$  — сумма по  $i(j)$  от 1 до 3.

Для обеспечения сходимости оценки аномального поля, описанного системой уравнений (3), решение которой неустойчиво, дополнительно вводится обработка близких точек маршрутов разного направления. Поэтому при калибровке очень важно наличие центральной точки, через которую приблизительно проходят маршруты всех четырех направлений.

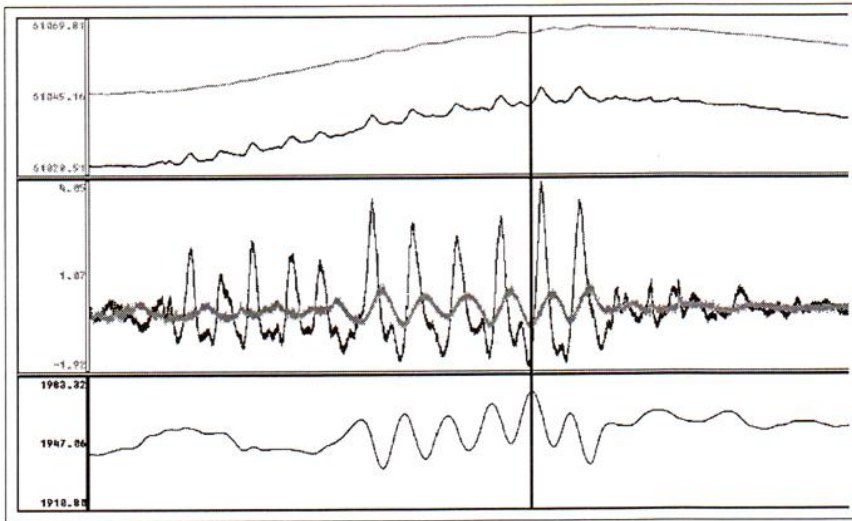


Рис. 1. Результаты обработки данных

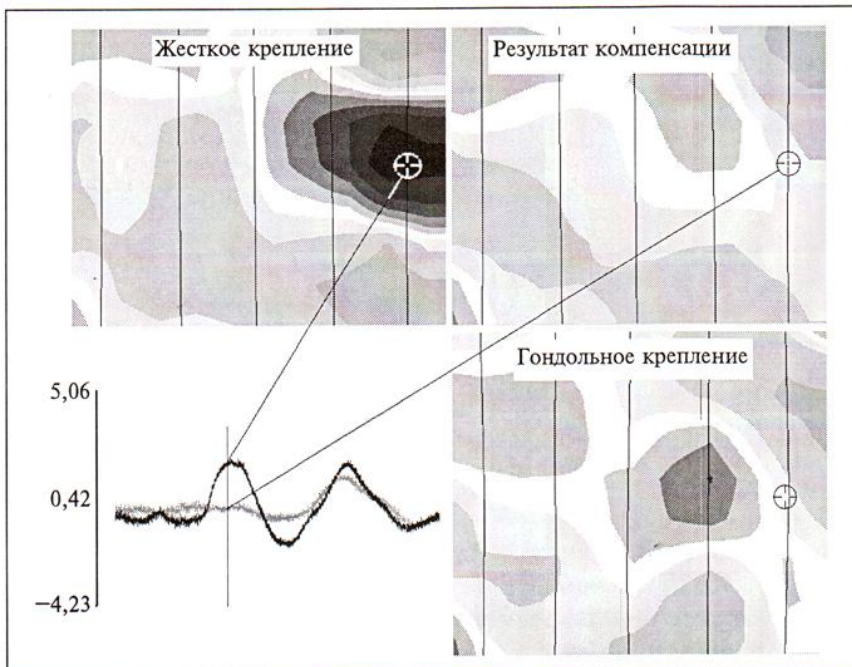


Рис. 2. Результаты компенсации

Она также полезна для оценки качества компенсации курсовой девиации.

Замкнутая задача оценивания (4) может быть решена методом калмановской фильтрации [7]. На рис. 1 представлены некоторые результаты численной обработки данных с применением такого метода в виде трех групп графиков. В верхней группе графики измерений магнитного поля до (черный) и после (серый) компенсации, в середине — их высокочастотные компоненты, значения шкал указаны в нанотеслах, внизу — высота в метрах. Видно, что остаток в скомпенсированных измерениях находится строго в противофазе с изменениями высоты, т. е. отражает перемещение в градиентном поле — с набором высоты поле уменьшается. Оценки вертикальных градиентов с учетом остатков после компенсации составляют величины порядка 0,01 нТл/м, т. е. находятся в области характерных значений.

По данным пробных полетов в Якутии точность прохождения через центральную точку составляла несколько метров, а повторяемость показаний магнитометра при разных курсах — 0,2 нТл. При этом во время обработки не вводились ни магнитные вариации, ни дифференциальные поправки GPS, поскольку не были установлены соответствующие базовые станции.

На рис. 2 показано качество компенсации при картировании

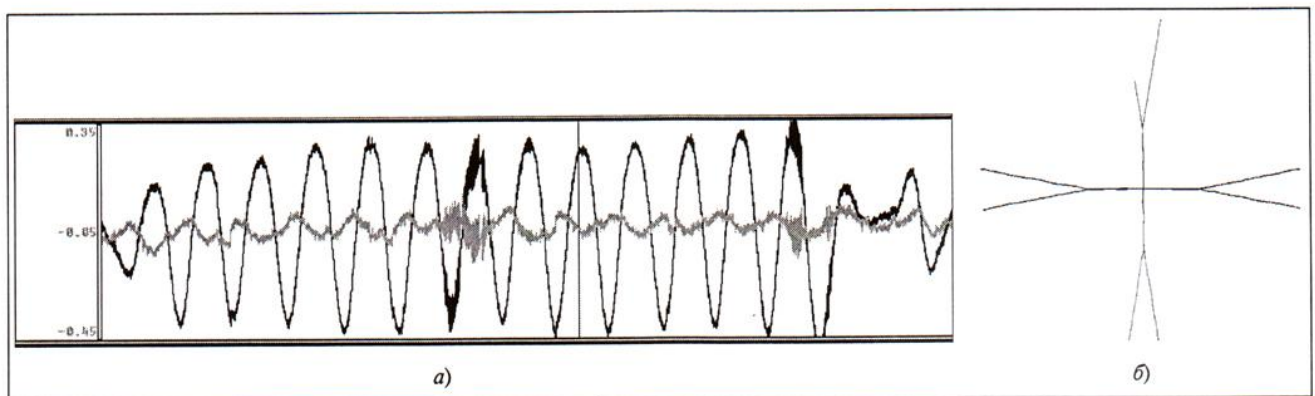


Рис. 3. Результаты обработки данных (а) и маршруты калибровки для полного вылета (б)

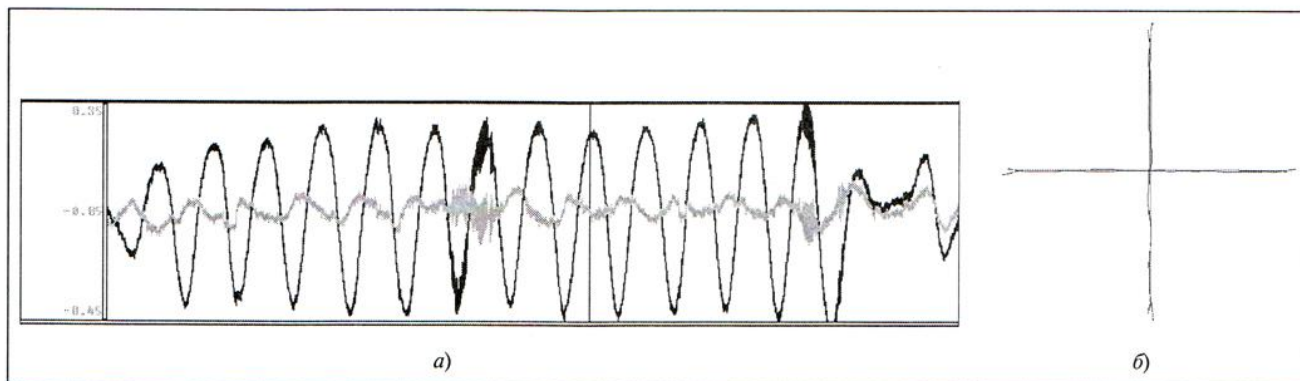


Рис. 4. Результаты обработки данных (а) и маршруты калибровки для “обрезанного” вылета (б)

аномального поля по данным, полученным в Якутии в 2005 г. Благодаря замкнутой постановке задачи (4), параметры компенсации не зависят от направления полета. Калибровочный полет был выполнен курсами 45; 135; 225; 315 градусов, а съемочные маршруты были заданы курсами 0; 180. При использовании ранее разработанных программ компенсации это было невозможно.

Опираясь на опыт работы по решению задачи компенсации, был предложен численный эксперимент — компенсация по результатам обработки данных, полученных на “обрезанном” вылете. За полный вылет была взята стандартная, описанная выше схема калибровочного по-

лета (рис. 3). “Обрезанный” вылет был получен из полного в результате отбрасывания “хвостов” (рис. 4). Были произведены две параллельные обработки данных: одна — для полного, другая — для “обрезанного” вылетов.

По аналогии с рис. 1 результаты обработки отражены на рис. 3, 4 черным цветом до, а серым после компенсации. Изображены только высокочастотные компоненты магнитного поля. Стохастические меры оцениваемости, полученные при работе прямого фильтра с данными полного и “обрезанного” вылетов отражены в таблице.

Из проведенной работы можно сделать вывод: результат компенсации для “обрезанного” вылета несущественно отличается от полного вылета и является приемлемым для использования (см. таблицу). Таким образом, при проведении компенсации достаточно производить вылет по упрощенной схеме, позволяющей сэкономить до четверти летного времени.

*Работа выполнена для ЗАО “Геотехнологии”, ЗАО ГНПП “Аэрогеофизика”, Амакинской ГРЭ АК “Алроса”. Используются данные, полученные в разное время компаниями ЗАО ГНПП “Аэрогеофизика”, Амакинская ГРЭ АК “Алроса”.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вершовский А. К., Пазгалев А. С., Александров Е. Б. Проект Л-СТС магнитометра // Журнал техниче-

ской физики. — 2000. — Т. 70. — Вып. 1. — С. 88—93.

2. Вацуро А. Э., Цирель В. С., Эринчек Ю. М., Андреев В. Я. Рекомендации по компенсации магнитных помех носителей аэрогеофизической аппаратуры. — Л.: НПО “Рудгеофизика”, 1983.
3. *Exploration Trends and Developments* / Ed. Brian Sylvester. — Geological Survey of Canada, Ottawa. — March, 2006.
4. Могилевкин В. А., Аверкиев В. В., Герловин М. С., Кандыуба С. Л., Осмоловский В. Н. Компенсация магнитных помех авиационных носителей // Разведка и охрана недр. — 2001. — № 9. — С. 52—58.
5. *Магниторазведка. Справочник геофизика.* / Под ред. В. Е. Никитского, Ю. С. Глебовского. 2-е изд., перераб. и доп. — М: Недра, 1990.
6. Лысенко А. П. Теория и методы компенсации магнитных помех // Геофизическое приборостроение. — Вып. 7. — Ленинград, 1960.
7. Александров В. В., Болтынский В. Г., Лемак С. С., Парусников Н. А., Тихомиров В. М. Оптимизация динамики управляемых систем. — М: МГУ, 2000.
8. Парусников Н. А., Голован А. А., Варавва В. Г. О стохастической мере оцениваемости // Коррекция в навигационных системах ориентации искусственных спутников Земли. — М.: МГУ, 1987. — С. 4—7.

Андрей Кириллович Волковицкий — вед. инженер, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН);

☎ (495) 333-90-02

E-mail: agp.geotechnology@gmail.com

Евгений Владимирович Каршаков — канд. физ.-мат. наук, вед. инженер, ИПУ РАН;

☎ (495) 333-90-02

E-mail: karshak@mail.ru

Максим Викторович Харичкин — аспирант МГУ им. М. В. Ломоносова.

☎ (495) 939-59-33

E-mail: mv\_harichkin@mail.ru

#### Стохастические меры оцениваемости

Коэффициент	Полный вылет	“Обрезанный” вылет
$K_1$	0,993	0,992
$K_2$	0,990	0,984
$K_3$	0,991	0,987
$L_{11}$	0,993	0,989
$L_{12}$	0,982	0,969
$L_{22}$	0,963	0,952
$L_{13}$	0,985	0,979
$L_{23}$	0,964	0,942
$M_{11}$	0,984	0,978
$M_{12}$	0,981	0,968
$M_{21}$	0,985	0,979
$M_{22}$	0,971	0,957
$M_{13}$	0,984	0,974
$M_{23}$	0,973	0,953
$M_{31}$	0,985	0,979
$M_{32}$	0,978	0,968