

УДК 004.896;681.2.082;681.518.3

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

А.Г. Коробейников, Ю.А. Копытенко, В.С. Исмагилов

Рассмотрены интеллектуальные информационные системы магнитных измерений, разработанные и применяемые в Санкт-Петербургском филиале учреждения Российской академии наук «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН» (СПбФ ИЗМИРАН). Данные системы основаны на знаниях и представляют собой комплекс программных, лингвистических и логико-математических средств для решения конкретных задач в режиме диалога на естественном языке.

Ключевые слова: интеллектуальные информационные системы, прогноз землетрясений, навигация по магнитному полю Земли, поиск магнитных объектов.

Введение

Как известно, современные интеллектуальные системы (ИС) подразделяются на два класса: системы общего назначения и специализированные [1]. Технология использования систем общего назначения состоит в следующем. Пользователь (эксперт) формирует знания (данные и правила), описывающие выбранную проблемную область. Далее на основании этих знаний, заданной цели, исходных данных и метапроцедур система генерирует и исполняет решение задачи. Данную технологию называют технологией систем, основанных на знаниях, или технологией инженерии знаний. Она позволяет специалисту, не обладающему профессиональными знаниями в области программирования, разрабатывать информационные прикладные приложения. В настоящее время инструментальными средствами общего назначения являются экспертные оболочки и языки обработки знаний [2, 3].

В общем случае все системы, основанные на знаниях, можно подразделить на системы, решающие задачи анализа, и на системы, решающие задачи синтеза. Основное отличие задач анализа от задач синтеза заключается в том, что если в задачах анализа множество решений может быть перечислено и включено в ИС, то в задачах синтеза множество решений потенциально не ограничено и строится из решений, наиболее удовлетворяющих техническому заданию.

Многие задачи, где используются данные магнитных измерений, относятся к плохо или слабо формализованным задачам. Для их решения в настоящее время широко применяются разновидности ИС – экспертные системы (ЭС) и интеллектуальные информационные системы (ИИС).

Задачи, решаемые при помощи ИИС, обычно классифицируют следующим образом: интерпретация, планирование, прогнозирование, мониторинг, проектирование, диагностика, обучение, контроль и управление.

ИИС магнитных измерений (МИ) в реальной практике учитывают специфику предметной области, и поэтому используют методы соответствующего класса. Обычно это интерпретация, прогнозирование, контроль и управление.

ИИС МИ для прогнозирования местоположения очага будущего сильного землетрясения

Наблюдения сверхнизкочастотных (СНЧ) и ультранизкочастотных (УНЧ) электромагнитных волн ($F=10-0,001$ Гц) в сейсмоактивных зонах проводятся в течение последних 15–20 лет, после появления высокочувствительных магнитометров. Результаты измерений в различных сейсмически активных районах Земли показали, что как на подготовительной стадии развития очаговых зон средних и сильных (магнитуда $M>5$) землетрясений, так и в период афтершоковой активности на больших расстояниях от будущего эпицентра наблюдаются аномальные СНЧ электромагнитные излучения большой интенсивности. Как правило, эти эмиссии имеют шумовой характер, возникают задолго до главного сейсмического толчка и продолжаются в течение всего периода сейсмической активности.

Измерения параметров геомагнитных вариаций в одной точке на поверхности Земли не позволяют определить направление на источник вариаций. ИИС МИ позволяют решить эту задачу, используя дифференциальные методы измерений. В настоящее время одним из основных методов является фазово-градиентный метод для исследования геомагнитных пульсаций. Этот метод позволяет по трем трехкомпонентным магнитным станциям, расположенным на земной поверхности треугольником на небольшом (до 5 км) расстоянии друг от друга (магнитный градиентометр), построить вектора градиентов и фазовых скоростей геомагнитных пульсаций вдоль земной поверхности для любой из трех компонент магнитного поля. При этом предполагается, что расстояние между станциями много меньше расстояния до источника геомагнитных вариаций и длины геомагнитной волны. В этом случае градиенты магнитного поля вариаций и фазовые скорости геомагнитных волн будут близки к истинным величинам. Вектора градиентов геомагнитных волн, как правило, направлены к локальному источнику пульсаций, а вектора фазовых скоростей – от источника. Если имеются данные МИ от двух магнитных градиентометров, разнесенных на расстояние примерно в 100 км, то ИИС МИ по пересечению направлений этих векторов позволяет определять местоположение источника (точнее, его проекцию на земную поверхность), т.е. проводить магнитную локацию [4].

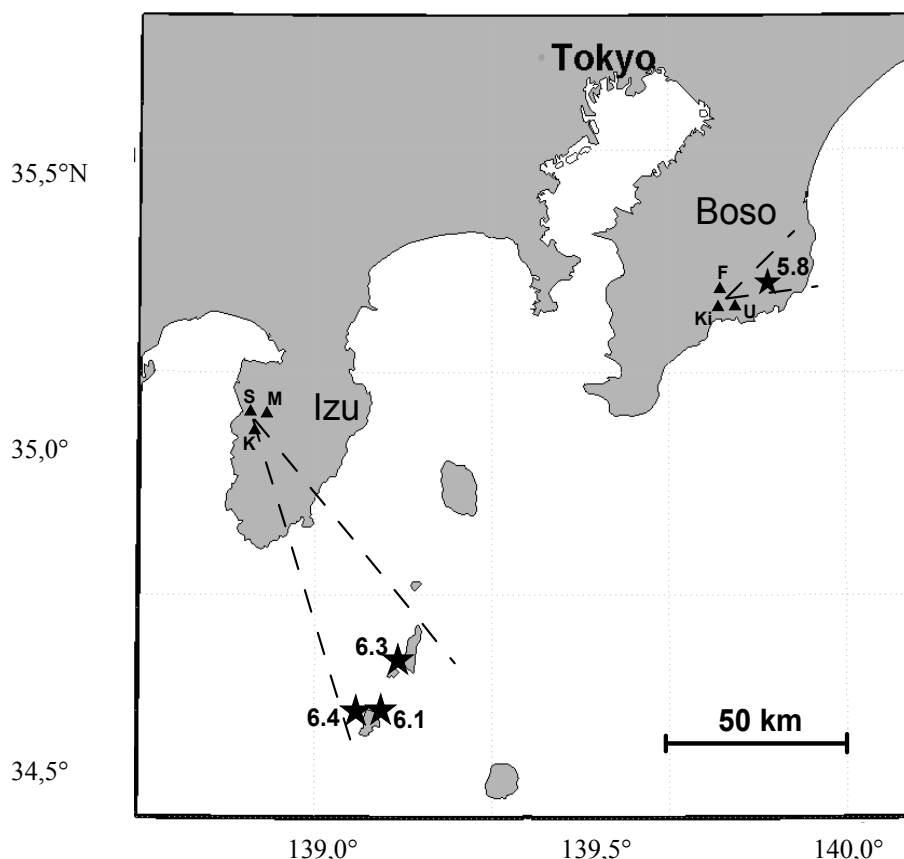


Рис. 1. Расположение магнитных станций и эпицентров сильных землетрясений в Японии. Треугольники – станции S, M, K (Сейкоши, Мочикоши, Камо) и F, Ki, U (Фудаго, Киосуи, Учиура), звездочки – эпицентры землетрясений, цифры рядом – магнитуда землетрясения

ИИС МИ в каждом конкретном случае принимает решение о нахождении градиентов и фазовых скоростей геомагнитных вариаций одним из двух способов – чисто экспериментальным путем или в рам-

ках модели плоской электромагнитной волны. В первом случае необходимо определять фазовые задержки и разности величин амплитуд вариаций между двумя любыми парами станций магнитного градиентометра, состоящего из трех разнесенных станций. Поскольку координаты магнитных станций и расстояние между ними известно, то можно определить градиенты и фазовые скорости для двух пар станций, выбранных из трех станций магнитного градиентометра, и затем построить вектор фазовой скорости и градиента пульсаций вдоль земной поверхности.

В рамках модели плоской электромагнитной волны величина фазовой скорости между двумя точками на земной поверхности определяется через амплитуды соответствующих компонент вариаций магнитного поля с учетом фазовой задержки.

Экспериментальная эксплуатация ИИС МИ для решения задач прогнозирования местоположения очагов будущих сильных землетрясений проводилась с 1998 года в Японии на полуостровах Изу и Босо, где велась регистрация вариаций магнитного поля Земли (МПЗ) и теллурических токов шестью высокочувствительными цифровыми трехкомпонентными магнитными станциями MVC-3DS, разработанными в СПбФ ИЗМИРАН. На рис. 1 показано расположение магнитных станций (черные треугольники) на территории Японии. Три станции расположены на полуострове Изу (Сейкоши, Мочикоши и Камо) и три – на полуострове Босо (Фудага, Учиура и Киосуи). Дискретность регистрируемых данных составляет 50 Гц, а для синхронизации одновременной работы магнитных датчиков используется система GPS на каждой станции. В состав ИИС МИ входили две группы по три станции MVC-3DS, представляющие собой магнитный градиентометр. Станции в каждой группе располагались на расстоянии 4–7 км друг от друга. Эпицентры землетрясений показаны звездочками. Цифры рядом с эпицентрами означают магнитуду землетрясения, определенную по 9-балльной шкале в соответствии с классификацией Японского метеорологического агентства (JMA). Землетрясения с $M > 6$ произошли в 2000 г., а с $M = 5,8$ – в 2003 г.

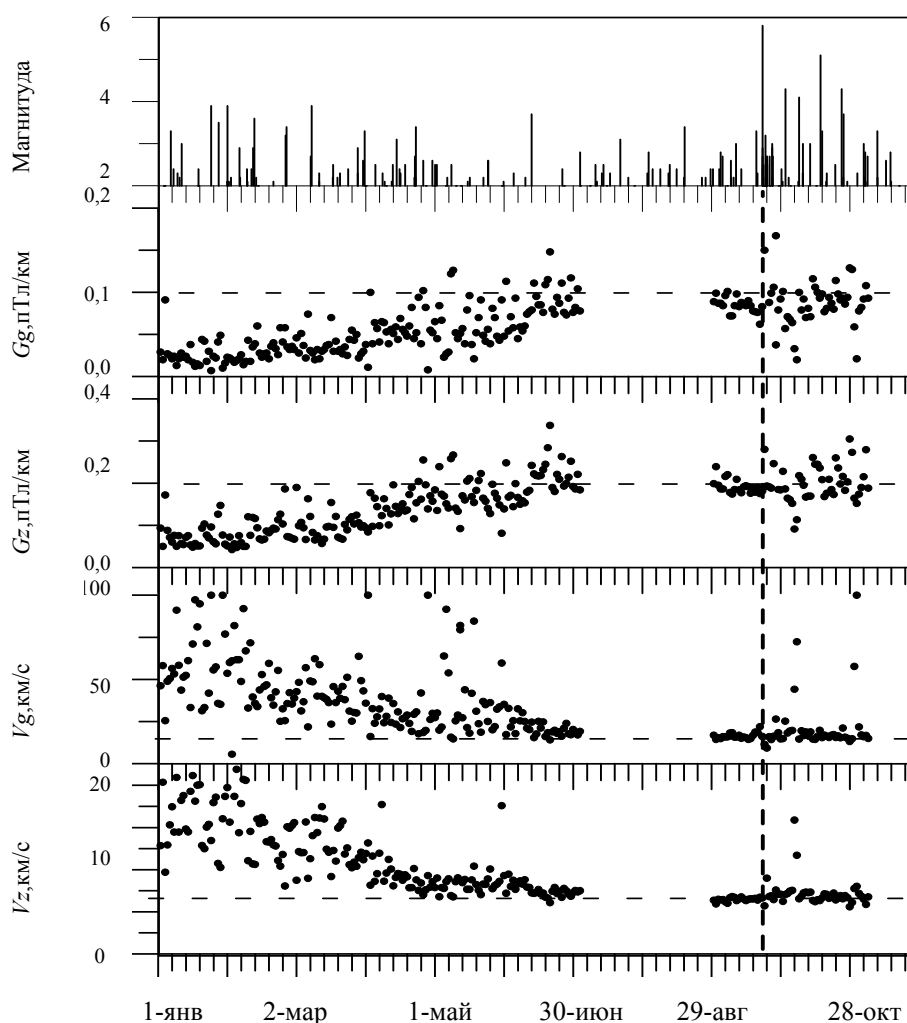


Рис. 2. Градиенты G_g , G_z и фазовые скорости V_g , V_z геомагнитных эмиссий ($F=0,1-0,4$ Гц) до и после землетрясения $M=5,8$ на полуострове Босо (Япония) в 2003 г.

Сейсмически активный период, в ходе которого произошло три землетрясения с магнитудой больше шести, начался 26.06.2000 г. и продолжался затем более трех месяцев. Самый сильный сейсмический толчок произошел 01.07.2000 г. и имел магнитуду $M=6,4$. Эпицентр этого землетрясения был расположен на глубине примерно 15 км под морской поверхностью на расстоянии примерно 85 км к юго-востоку от магнитных станций, размещенных на полуострове Изу, и на расстоянии примерно 140 км к юго-западу от магнитных станций, расположенных на полуострове Босо (рис. 1).

Сейсмическая активность в районе полуострова Босо развивалась в течение всего 2003 года и характеризовалась большим количеством слабых и средних сейсмических толчков ($M < 4$) вокруг магнитных станций, установленных здесь. Самый сильный толчок имел магнитуду 5,8 балла (по шкале JMA) и произошел 20.09.2003 г. на глубине 60 км. Эпицентр его находился примерно в 15 км к северо-востоку от станции Киосуми (рис. 1).

На рис. 2 показано полученное при помощи ИИС МИ anomальное поведение градиентов и фазовых скоростей геомагнитных эмиссий в частотном диапазоне $F=0,1-0,4$ Гц. На рисунке символы V_g , V_z , G_g , G_z означают фазовые скорости и градиенты в полной горизонтальной и вертикальной компонентах МПЗ. Верхняя панель – магнитуды сейсмических толчков ($M > 2$) в окрестности до 50 км от магнитных станций. Из рисунка видно, что в 2003 году на полуострове Босо примерно за полгода до момента землетрясения с магнитудой $M=5,8$, отмеченного на рис. 2 вертикальной пунктирной линией, градиенты в полной горизонтальной и в вертикальной компонентах МПЗ начинают возрастать и достигают своего максимума за 2–3 месяца до землетрясения. В это же время фазовые скорости уменьшаются, и минимальные значения наблюдаются перед землетрясением.

Такое же, но менее выраженное anomальное поведение градиентов и фазовых скоростей наблюдается также и в более низкочастотном диапазоне СНЧ геомагнитных возмущений ($F < 0,1$ Гц). К сожалению, данные за июль и август 2003 г. на одной из магнитных станций отсутствуют, что не позволяет построить вектора градиентов и фазовых скоростей.

Таким образом, представленные результаты показывают, что применение ИИС МИ позволяют определять местоположение источника будущего сильного землетрясения, т.е. давать краткосрочный прогноз сильного землетрясения.

ИИС МИ в навигационных системах беспилотных летательных аппаратов

В настоящее время в России и за рубежом растет интерес к использованию ИИС МИ для построения систем автономной магнитной навигации (САМН) по МПЗ для различных типов летательных аппаратов (ЛА), таких как самолетов, космических аппаратов (КА) и беспилотных летательных аппаратов (БЛА) на малых высотах [5, 6].

Это обусловлено преимуществами САМН: высокой автономностью, помехозащищенностью и точностью, малым весом и потреблением электроэнергии, малыми габаритами, возможностью функционирования в любых метеоусловиях и в любое время суток. Кроме того, эта система практически не накладывает ограничений на угловые эволюции БЛА в процессе полета. Помимо этого, использование САМН, особенно на борту БЛА, предназначенных для полета на малых высотах, позволяет увеличивать точность навигационного обеспечения БЛА при проведении измерений МПЗ с уменьшением высоты его полета в соответствии с известным свойством МПЗ, и особенно anomального МПЗ (АМПЗ) – повышением его информативности в связи с уменьшением расстояния до ферромагнитных источников при использовании больших градиентов АМПЗ.

Многие из вышеперечисленных преимуществ САМН обусловлены достоинствами существующих и разрабатываемых в настоящее время магнитометров, в частности, на основе магниторезистивных датчиков (МРД).

Для повышения эффективности обеспечения БЛА целесообразно использовать САМН в сочетании с инерциальной системой навигации (ИСН).

ИИС МИ, находящаяся на борту БЛА, производит сравнение измеренных X_i и модельных значений X_p параметров АМПЗ, определяемых на основе бортовой магнитной карты (МК) заданного района. После этого ИИС МИ определяет вектор поправок состояния параметров движения БЛА – ΔX . С помощью этого вектора производится коррекция расчетного вектора состояния X_p , определяемого ИСН или скоростной системой счисления пути. Кроме этого, ИИС МИ, на основе данных от ИСН, обеспечивает навигацию БЛА и выполнение его основных задач в аварийных ситуациях – например, при отказе МРД, переходя в режим «памяти», а также используя его при больших естественных и искусственных возмущениях МПЗ, особенно при движении по маршрутам, проходящим по мерным участкам, где АМПЗ малоинформативно, т.е. его градиенты характеризуются малыми величинами.

ИИС МИ при решении задачи определения параметров движения БЛА, помимо использования измерений АМПЗ, также привлекает дополнительную информацию в виде измерений магнитных полей ферромагнитных объектов, находящихся на маршрутах полетов БЛА, например, железнодорожных мос-

тов, рельсовых путей, трубопроводов, линий электропередачи и т.д. При этом магнитные поля этих объектов должны быть занесены в МК заданного района.

Известные в настоящее время ИИС МИ, использующие абсолютные измерения и градиентный принцип формирования приращений измерений АМПЗ, в полной мере не учитывают длиннопериодные составляющие ошибок основных возмущающих факторов – вариаций МПЗ, магнитных бурь, собственных магнитных полей БЛА, ошибок построения МК (моделей МПЗ), ошибок МРД. Эти неточности учета возмущений, особенно вариаций МПЗ в период магнитных бурь, могут приводить к значительным, а в ряде случаев и к недопустимо большим ошибкам. В результате анализа основных возмущающих факторов выявлено, что длиннопериодные составляющие ошибки магнитометрических измерений имеют в большинстве случаев большую амплитуду по сравнению с высокочастотными составляющими.

Эта закономерность, т.е. существенно большее отрицательное влияние длиннопериодных возмущений на точностные характеристики САМН, относится не только к вариациям МПЗ, но и к помехам, создаваемым собственными магнитными полями БЛА, ошибкам построения магнитных карт, а также погрешностям магнитометрической аппаратуры, магниторезистивных датчиков.

Для уменьшения отрицательного влияния возмущающих факторов, как долгопериодических, так и высокочастотных составляющих, на точностные параметры САМН необходимо использовать в ИИС МИ адаптивные статистические методы линейного и нелинейного оценивания вектора состояния.

Адаптивные методы оценивания разработаны в СПбФ ИЗМИРАН на основе способа формирования взвешенных приращений параметров АМПЗ и усовершенствованных статистических методов линейного и нелинейного оценивания вектора состояния, которые, в частности, осуществляют осреднение высокочастотных составляющих ошибок измерений.

ИИС МИ для поиска стационарных магнитных объектов, находящихся под водой

Для поисковых работ по обнаружению стационарных магнитных объектов, находящихся под водой, или магнитной съемки акватории моря для построения карт распределения пространственных вариаций градиентов магнитного поля также применяются ИИС МИ.

Основной особенностью ИИС МИ, разработанной в СПбФ ИЗМИРАН, является нахождение магнитных чувствительных элементов (магнитометров) на борту носителя (судна). В состав такой ИИС МИ входят мобильные автоматизированные градиентометрические установки (АГУ), состоящие из двух пространственно разнесенных высокочувствительных цифровых трехкомпонентных магнитовариационных станций GI-MTS-1, изготовленные в СПбФ ИЗМИРАН. Высокая чувствительность магнитометров комплекса GI-MTS-1 позволяет проводить высокоточный мониторинг вариаций УНЧ электромагнитных и сейсмических полей с целью изучения динамики источников УНЧ возмущений ионосферного, литосферного и техногенного происхождения.

Измеренные вариации магнитного поля включают в себя естественные вариации ионосферного происхождения, поле локальной магнитной аномалии (если оно существует), помехи, возникающие вследствие вибраций и индуктирования токов в электропроводящих элементах носителя, и вариации, возникающие при качке вследствие изменения ориентации магнитных датчиков. Естественные вариации ионосферного происхождения в районе работ в дневные часы в диапазоне частот $F=0,5-0,1$ Гц обычно имеют малую амплитуду ($<0,2$ нТл) и могут быть проигнорированы. Помехи, возникающие вследствие вибраций при движении носителя, имеют частоты выше 1 Гц и частично подавляются виброгасящими основаниями под датчиками, а частично – цифровой фильтрацией.

Наибольший вклад в помеху измерений вариаций МПЗ вносит изменение ориентации магнитных датчиков вследствие изменения курса, бортовой и килевой качки. Например, величина вертикальной компоненты МПЗ на широте Санкт-Петербурга составляет примерно 50000 нТл. Отклонение от вертикальной оси на 1° при качке приводит к появлению в горизонтальных компонентах квазисинусоидального сигнала с частотой качки и амплитудой ~ 1000 нТл ($\sin 1^\circ \times 50000 \approx 1000$). Проблема для этого типа помехи решается с помощью дифференциальных измерений на малой базе разнеса датчиков (2–6 м). Оба блока разнесенных магнитных датчиков жестко связаны с носителем. Поэтому изменения ориентации носовых и кормовых магнитных датчиков происходят одинаковым образом и синхронно, вследствие чего помеха от качки при вычислении разности соответствующих компонент магнитного поля (дифференцировании) исчезает. Угловыми перекосами, возникающими вследствие скручивания носителя вокруг продольной оси, при малой базе разнеса также можно пренебречь. Сигнал же от источника магнитной аномалии остается, так как кормовые датчики регистрируют поле источника с задержкой относительно носового. Градиент вариаций магнитного поля находится путем деления разности сигналов двух разнесенных датчиков на расстояние между ними.

Для проверки методики измерений и работоспособности градиентных установок на глубине 10 м была затоплена мишень (верхняя часть бакена весом около 200 кг). АГУ были установлены внутри малого гидрографического катера (МГК) с разнесом магнитных датчиков 4 м вдоль диаметральной плоскости

катера. МГК в течение 2 дней выполнил 50 галсов в районе расположения мишени. После обработки зарегистрированных вариаций МПЗ построена карта двумерного распределения дифференциальных величин вариаций компонент МПЗ.

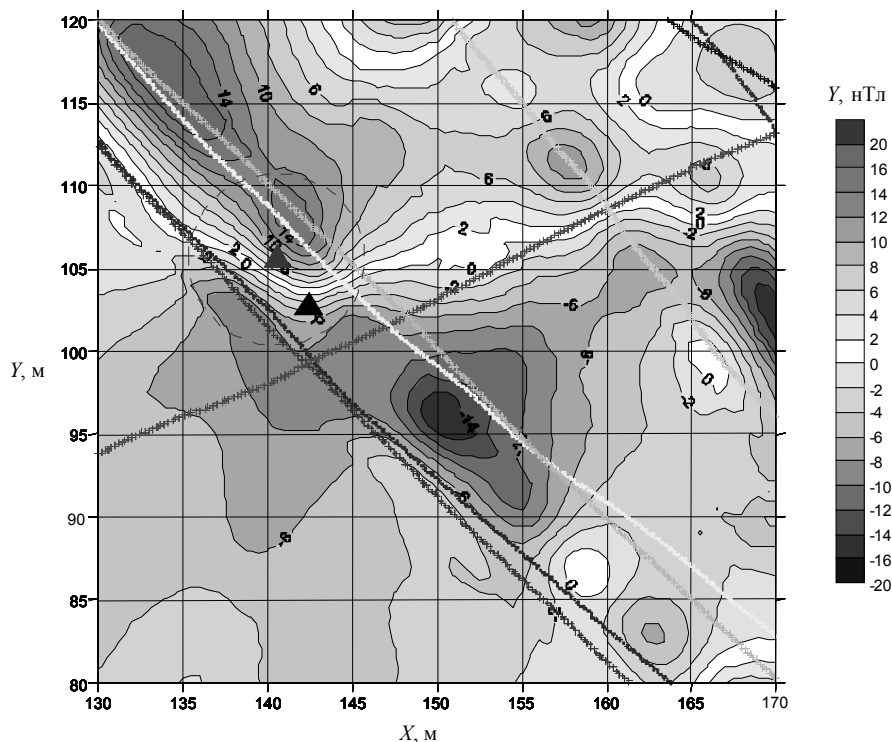


Рис. 3. Пространственное распределение Y компоненты градиента магнитного поля в районе мишени

На рис. 3 различными оттенками серого цвета и изолиниями показано распределение дифференциальных величин вариаций Y компоненты поля на площадке $40 \times 40 \text{ м}^2$. Линиями на рисунке нанесены треки движения МГК. Серым треугольником на рисунке отмечено положение мишени, черным треугольником – положение мишени по распределению градиентов магнитного поля. Погрешность в определении местоположения мишени составляет 4 м. Поскольку для определения координат МГК использовался входящий в состав ИИС МИ недифференциальный приемник GPS со среднеквадратичной погрешностью 8 м, то результаты тестирования методики измерений и аппаратуры можно считать успешными.

Заключение

Применение ИИС МИ позволяет эффективно решать различные задачи. В данной работе рассмотрены применения этих систем для решения трех задач. Дальнейшее развитие ИИС МИ предполагается проводить в нескольких направлениях: модификация и разработка математического, лингвистического, программного и технического обеспечения. Например, в задаче поиска стационарных магнитных объектов, находящихся под водой, дополнительное введение в состав ИИС МИ системы косвенной стабилизации позволит повысить на порядок способность системы к обнаружению намагниченных объектов.

Литература

1. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб: Питер, 2000. – 384 с.
2. Попов Э.В. Экспертные системы: Решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ. – М.: Наука, 1987. – 288 с.
3. Корнеев В.В., Гараев А.Ф., Васютин С.В., Райх В.В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации. – М.: Нолидж, 2001. – 352 с.
4. Копытенко Ю.А., Исмагилов В.С., Копытенко Е.А., Воронов П.М., Зайцев Д.Б. Магнитная локация источников геомагнитных возмущений // ДАН. Серия «Геофизика». – 2000. – Т. 371. – № 5. – С. 685–687.

5. Табачук И., Ташкев Л. Угроза с предельно малых высот // Воздушно-космическая оборона. – 2007. – № 1 (32). – С. 50–57.
6. Лебедев Д.В., Ткаченко А.И. Магнитометрическая система определения параметров движения космического аппарата // Проблемы управления и информатики. – 1997. – № 4. – С. 139–154.

- Коробейников Анатолий Григорьевич** – Санкт-Петербургский филиал учреждения РАН «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова», доктор технических наук, профессор, директор по науке, Korobeynikov_A_G@mail.ru
- Копытенко Юрий Анатольевич** – Санкт-Петербургский филиал учреждения РАН «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова», доктор физ.-мат. наук, профессор, директор, office@izmiran.spb.ru
- Исмаилов Валерий Сарварович** – Санкт-Петербургский филиал учреждения РАН «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова», кандидат физ.-мат. наук, вед. научн. сотр., IVS@izmiran.spb.ru