

ЩЕРБАКОВ Григорий Николаевич, профессор, доктор технических наук

АНЦЕЛЕВИЧ Михаил Александрович, доктор технических наук

УДИНЦЕВ Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук

ВЫБОР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕТОДА ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОИСКА ОБЪЕКТОВ В ТОЛЩЕ УКРЫВАЮЩИХ СРЕД

В статье рассмотрены магнитометрический, индукционный и радиолокационный методы зондирования укрывающих сред на предмет возможности их использования для поиска малоразмерных рукотворных объектов глубинного заложения. Область применения: строительство и эксплуатация подземных коммуникаций, борьба с терроризмом, гуманитарное разминирование, археология и др.

Задача обнаружения объектов в укрывающих средах (земле, воде, снеге и т.д.) возникает при поиске нефте- и газопроводов, затонувшей техники, стрелкового, огнестрельного и холодного оружия, невзорвавшихся авиабомб и артиллерийских снарядов, инженерных противотанковых, противодесантных и противопехотных мин. В настоящее время в условиях строительства объектов различного назначения, оживления промышленного производства в стране, а также действий криминальных и радикальных группировок, актуальность поиска объектов в укрывающих средах определяется необходимостью решения задачи обеспечения безопасности населения, организаций и предприятий.

Наиболее распространенными неконтактными электромагнитными методами поиска малоразмерных объектов на глубинах до 10 м в настоящее время являются магнитометрический, индукционный и радиолокационный.

Для комплексного применения различных методов обнаружения объектов в укрывающих средах необходимо знать их характеристики и возможности.

Одними из самых важных характеристик поисковых приборов являются:

- тип объектов поиска (ферромагнитные, металлические немагнитные и немагнитные);
- предельная глубина обнаружения;
- безопасность поиска.

Последний пункт оценивается по наличию у поискового прибора собственных зондирующих электромагнитных полей и их интенсивностью, способной вызвать срабатывание электронных цепей управления взрывных устройств. Наиболее однозначно

безопасность поиска можно оценить по тому, активный или пассивный метод локации положен в основу работы прибора.

Магнитометрический метод относится к пассивным методам поиска и позволяет зафиксировать пространственные искажения магнитного поля Земли, создаваемые ферромагнитными объектами (*рис. 1*) и источниками магнитного поля. Этот метод наиболее приемлем для поиска объектов военного назначения, большинство из которых имеет в своем составе ферромагнитные элементы. Наиболее распространенными ферромагнитными объектами поиска (из чугуна, стали, железоникелевых сплавов и др.) являются: стрелковое, старинное огнестрельное и холодное оружие, невзорвавшиеся авиабомбы и артиллерийские снаряды, большинство инженерных противотанковых, противодесантных и противопехотных мин, стальные нефте- и газопроводы и т.д. Источником магнитного поля могут служить электронные устройства, находящиеся в активном состоянии.

Обнаружение диэлектрических (пластмассовых, деревянных и т.п.), а также диамагнитных (дюралюминиевых, золотых, серебряных, бронзовых и т.п.) объектов с использованием этого метода невозможно.

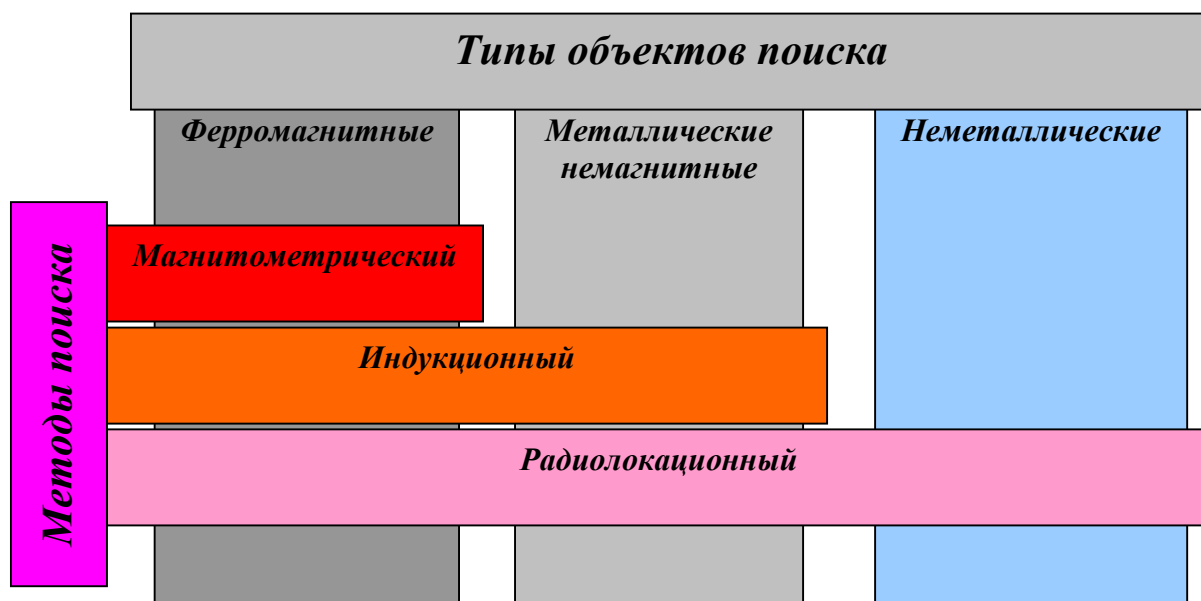


Рис. 1. Типы объектов поиска, обнаруживаемых различными методами

Зависимость (1), приведенная в работе [1], позволяет рассчитывать модуль требуемой чувствительности поискового магнитометрического прибора в зависимости от геометрических размеров и магнитной проницаемости идеализированного объекта поиска в форме ферромагнитной сферы, его предельной глубины залегания и длины базы поискового прибора:

$$\Delta H_{вн}^{1-2} \approx 2H_0 r_{сф}^3 \frac{\mu_{сф} - \mu_{вн}}{\mu_{сф} + 2\mu_{вн}} \left(\frac{1}{r_{обн}^3} - \frac{1}{(r_{обн} + l)^3} \right) \quad (1)$$

где $r_{сф}$ – радиус объекта поиска в форме ферромагнитной сферы, м;

$\mu_{сф}$ – относительная магнитная проницаемость объекта поиска;

$\mu_{вн}$ – относительная магнитная проницаемость внешней укрывающей среды;

H_0 – модуль напряженности постоянного магнитного поля Земли, А/м;

l – расстояние между феррозондами (длина базы поискового прибора), м;

$r_{обн}$ – предельная глубина залегания (обнаружения) объекта поиска, м.

Из (1) получаем зависимость, связывающую геометрические размеры объекта поиска с его предельной глубиной обнаружения:

$$r_{сф} \approx \sqrt[3]{\frac{2 H_0}{\Delta H_{вн}} \frac{\mu_{сф} - \mu_{вн}}{\mu_{сф} + 2 \mu_{вн}} \left(\frac{1}{r_{обн}^3} - \frac{1}{(r_{обн} + l)^3} \right)} \quad (2)$$

На рис. 2 представлены результаты расчета по формуле (2) при чувствительности поискового прибора по градиенту напряженности магнитного поля 0,001 А/м и длине базы поискового прибора 1 м (кривая 5).

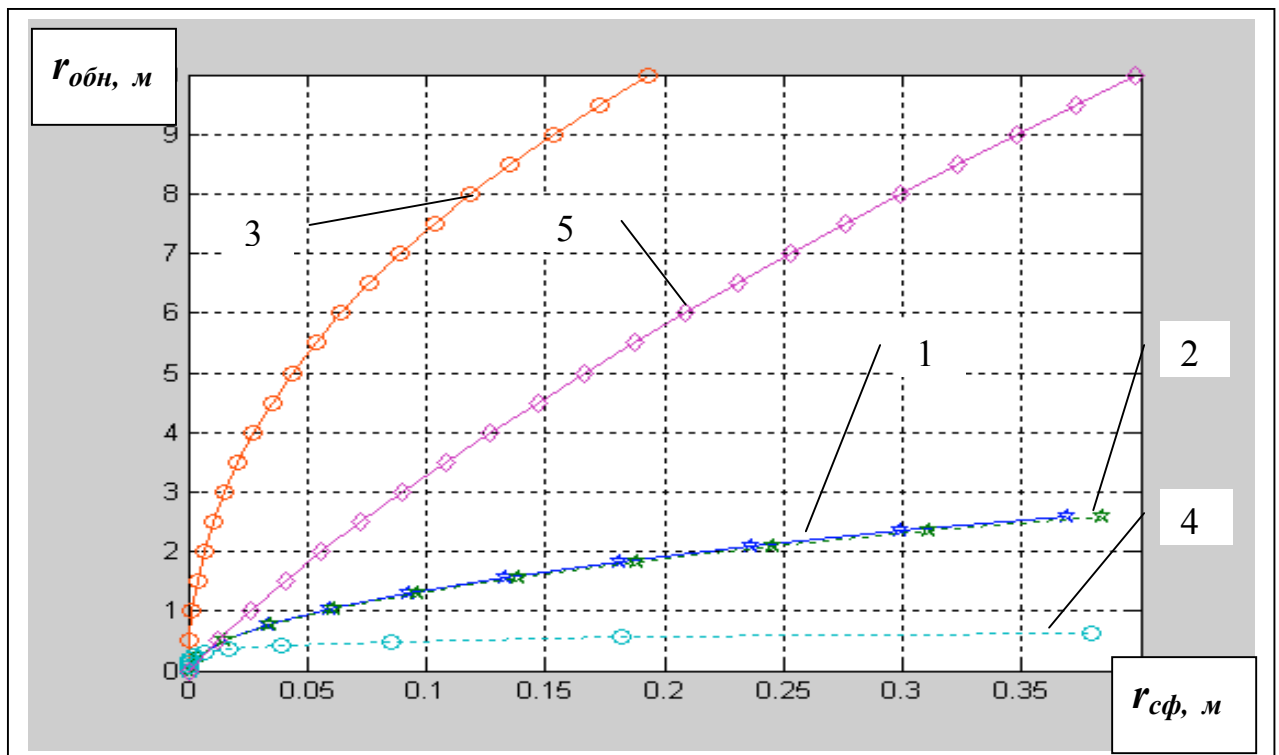


Рис. 2. Зависимость глубины обнаружения металлической сферы от ее радиуса для различных методов поиска и параметров укрывающих сред, где

- 1 – индукционный метод, сухой грунт;
- 2 – индукционный метод, влажный грунт;
- 3 – радиолокационный метод, сухой грунт;
- 4 – радиолокационный метод, влажный грунт;
- 5 – магнитометрический метод, грунт любой влажности при $\mu_{вн} = 1$

Основными преимуществами данного метода являются:

- возможность обнаружения локальных ферромагнитных объектов и источников магнитного поля практически в любых естественных укрывающих средах (глинистых и песчаных грунтах, пресной и морской воде, льдах и т.д.);
- повышенная глубинность поиска (рис. 2);
- высокая скорость поиска за счет более узкого, чем в других методах, круга объектов поиска (рис. 1);

- более высокая, чем в других методах, безопасность поиска взрывных устройств, за счет отсутствия собственных зондирующих полей, способных вызвать случайное срабатывание взрывных устройств;
- невысокая требовательность к квалификации оператора, обусловленная простотой эксплуатации магнитометрических приборов.

Данный метод не лишен недостатков, основными из которых являются:

- ограниченный круг обнаруживаемых объектов;
- значительные затруднения использования переносной аппаратуры на основе этого метода внутри и вблизи современных сооружений (зданий, мостов, аэродромных покрытий и т.д.) из-за мешающего влияния стальных элементов их конструкций (арматуры, балок, труб и т.д.), а также в горной местности, богатой металлосодержащими рудами;
- дороговизна приборов и сложность в их изготовлении (рис. 3);
- подверженность помеховому влиянию мелких, близкорасположенных предметов при поиске крупных объектов глубинного заложения.

Индукционный метод относится к активным методам поиска и позволяет обнаруживать рукотворные объекты, выполненные из любого металла или имеющие отдельные металлические элементы в своей конструкции (рис. 1). Причем металл может быть как ферромагнитным, так и диамагнитным.

В [1, 2] приведено выражение, позволяющее в первом приближении оценить плотность потока мощности вторичного магнитного поля от металлической сферы в индукционном методе:

$$P_{пр} \approx \frac{\rho_0 M_z^2 D^2 r_{сф}^6}{80 r_{обн}^{12}} e^{-8\pi \sqrt{\frac{30 \gamma_{укрсп}}{\lambda}}} \quad (3)$$

где

ρ_0 – волновое сопротивление свободного пространства, Ом;

M_z – магнитный момент генераторного магнитного диполя, $A \times m^2$;

D – величина, определяющая аномальное поле на поверхности объекта поиска (в нашем случае $D = 0,9$);

λ – длина волны зондирующего поля, м;

$\gamma_{укрсп}$ – удельная электрическая проводимость укрывающей среды, См/м.

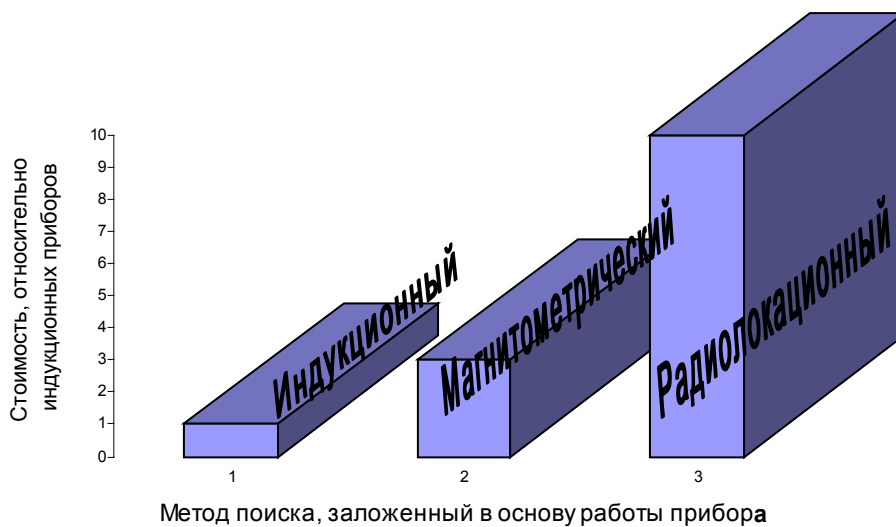


Рис. 3. Относительная стоимость переносных поисковых приборов (стоимость глубинных индукционных переносных поисковых приборов составляет $\approx 300 \dots 3000$ у.е.)

Необходимо отметить, что в (3) развязка между приемо-передающими трактами принята «идеальной», то есть не учитывается сигнал прямого прохождения из передающей антенны в приемную.

Из (3) получаем зависимость, связывающую геометрические размеры объекта поиска с его предельной глубиной обнаружения в индукционном методе:

$$r_{сф} \approx r_{обн}^2 e^{\frac{4}{3}\pi \sqrt{\frac{30 \gamma_{укрсп}}{\lambda}}} \sqrt[6]{\frac{80 \Pi_{np}}{\rho_0 M_z^2 D^2}} \quad (4)$$

На рис. 2 представлены результаты расчета по формуле (2) при мощности, подводимой к передающей антенне $P_a = 1$ Вт, $\lambda = 30$ км, $\Pi_{np} = 10^{-7}$ Вт/м², $M_z = 1$ А×м².

Основными преимуществами данного метода являются:

- способность обнаруживать объекты из любого металла, представляющие наибольший интерес из всех объектов поиска;
- простота «отсева» мелких металлических «помеховых» предметов (гильз, осколков боеприпасов и др.) при разнесении генераторной и приемной магнитных антенн (металлоискатель на прием-передаче), что очень важно при поиске крупных объектов;

- невысокая требовательность к квалификации оператора;
- относительная дешевизна поисковой аппаратуры (рис. 3);
- незначительное влияние грунта на процесс поиска.

К недостаткам индукционного метода можно отнести:

- небольшую глубину обнаружения, соизмеримую с длиной базы (расстоянием между передающей и приемной катушками) и практически составляющая десятые доли...единицы метров;
- подверженность эфирным помехам (гроза, линии электропередач и т.п.).

Радиолокационный метод относится к активным методам поиска и позволяет обнаруживать рукотворные объекты, выполненные как из любых металлов, так и неметаллические (рис. 1).

В [1, 2] приведено выражение, позволяющее оценить плотность потока мощности, отраженного от объекта поиска сферической формы в месте расположения приемной антенны при вертикальном зондировании радиолокационным методом:

$$P_{пр} \approx \frac{P_{a(имп)} \sigma_{сф} G_{пер}}{(4 \pi r_{обн}^2)^2} T_{прох}^4 e^{-\frac{240 \pi \gamma_{укрср}}{\sqrt{\epsilon}} h}, \quad (5)$$

где

$P_{a(имп)}$ – мощность в импульсе для радиолокационного искателя, Вт;

$G_{пер}$ – коэффициент передачи;

$r_{обн}$ – расстояние от центра сферы до приемной антенны;

h – глубина залегания объекта поиска. В данном случае $h \approx r$;

$\epsilon_{укрср}$ – относительная диэлектрическая проницаемость укрывающей среды;

$\sigma_{сф}$ – эффективная отражающая площадь объекта поиска, м².

Для металлической сферы:

$$\sigma_{сф} \approx \pi r_{сф}^2, \quad (6)$$

$$T_{прох} \approx \frac{2}{\sqrt{\epsilon_{укрср}} + 1}. \quad (7)$$

Из (5), (6) и (7) получаем зависимость, связывающую геометрические размеры объекта поиска с его предельной глубиной обнаружения в радиолокационном методе:

$$r_{сф} \approx \frac{4 \pi r_{обн}^2 e^{\frac{120 \pi \gamma_{укрср}}{\sqrt{\epsilon_{укрср}}} r_{обн}}}{T_{прох}^2} \sqrt{\frac{\Pi_{пр}}{\pi P_{a(имп)}} G_{пер}}}. \quad (8)$$

На *рис. 2*. представлены результаты расчета по формуле (8) при мощности, подводимой к передающей антенне $P_a = 1$ Вт, $\Pi_{пр} = 10^{-8}$ Вт/м², $P_{a(имп)} = 1$ кВт, $G_{пер} = 1$.

Основными преимуществами данного метода являются:

- способность к обнаружению любых неоднородностей в грунте (металлы, пластмассы, пустоты и др.);
- возможность приближенно определять глубину залегания объекта поиска.

Недостатки метода:

- низкая селективность, обусловленная неоднозначностью интерпретации характера выявленной аномалии;
- недостаточная глубинность в грунтах с повышенным затуханием электромагнитных волн (влажный суглинок, болото и т.д.);
- высокая стоимость (*рис. 3*) и сложность в изготовлении приборов;
- низкий темп поиска, обусловленный значительными затратами времени на обработку результатов измерений;
- высокие требования к квалификации оператора.

Анализ основных существующих электромагнитных методов зондирования укрывающих сред позволяет сделать следующие выводы:

1. Идеального метода для применения в целях глубинного поиска не существует. Для каждого конкретного случая, исходя из характеристик грунта, типа и предельно возможной глубины заложения объектов поиска, подбирается наиболее приемлемый метод поиска.
2. Наиболее приемлемым для поиска объектов военного назначения в широком спектре грунтов является магнитометрический метод.
3. В ряде ситуаций ни один из методов не способен обеспечить требуемую глубину поиска.

Существенное увеличение глубины поиска и селективности обнаружения объектов поиска известными методами возможно применением принципиально нового метода поиска скрытых малоразмерных объектов – параметрической локации [2, 3, 4].

Например, увеличение предельной глубины обнаружения ферромагнитных объектов поиска возможно методом дистанционного параметрического подмагничивания [5], являющимся частным случаем нелинейно-параметрической локации. Метод основан на способности намагниченного тела исказить линии магнитного поля Земли сильнее, чем не намагниченного, и позволяет увеличить глубину обнаружения магнитометрическим поисковым прибором в 1,5 – 3 раза.

Литература:

1. Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н. Оценка предельной глубины обнаружения ферромагнитных объектов искусственного происхождения в толще полупроводящей среды./Специальная техника, 2004, №2.
2. Щербаков Г.Н. Обнаружение объектов в укрывающих средах. Для криминалистики, археологии, строительства и борьбы с терроризмом. М.: Арбат-Информ, 1998.
3. Щербаков Г.Н. Обнаружение скрытых объектов – для гуманитарного разминирования, криминалистики, археологии, строительства и борьбы с терроризмом. М.: Арбат-Информ, 2004.
4. Щербаков Г.Н. Параметрическая локация – новый метод обнаружения скрытых объектов./Специальная техника, 2000, №4, с. 52 – 58.
5. Устройство для обнаружения ферромагнитных объектов глубинного заложения./Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н., Миронов С.И. Патент N38963 от 18.03.2004г.