

УДК 620.179.1

*А.И. ПОТЕКАЕВ¹, В.А. ДОНЧЕНКО¹, С.Д. ЗАМБАЛОВ¹, Г.Н. ПАРВАТОВ¹, И.М. СМИРНОВ²,
В.А. СВЕТЛИЧНЫЙ¹, В.П. ЯКУБОВ¹, И.А. ЯКОВЛЕВ¹*

СОСТОЯНИЕ И ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ В РОССИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИНЖЕНЕРНОЙ РАЗВЕДКИ

Проведен анализ наиболее эффективных методов, приемов и научно-технических разработок индукционных металлоискателей, приведены их сравнительные тактико-технические характеристики, намечены приоритетные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: индукционный металлоискатель, инженерная разведка.

Анализ научных исследований последних 10-летий свидетельствует, что НИОКР интенсивно ведутся по поиску новых подходов к созданию современных методов и технических средств обнаружения минно-взрывных устройств (МВУ) с улучшенными поисковыми и эксплуатационными характеристиками. При этом, как и прежде, основное внимание уделяется разработкам электромагнитных методов поиска, основанных на использовании контрастов по электропроводимости, диэлектрической и магнитной проницаемостям, а также эффектов нелинейной проводимости объектов поиска.

Необходимость разработок новых и модернизации известных методов и технических средств дистанционного обнаружения МВУ в различных вмещающих средах обусловлена, с одной стороны, современным состоянием науки и новыми технологиями производства, а с другой стороны, широким использованием МВУ с минимальным содержанием металла при отсутствии адекватных устройств их обнаружения.

Несомненно, одним из самых актуальных остается направление исследований по разработке электромагнитных методов, устройств и систем, основанных на индукционных, радиоволновых, магнитометрических и нелинейно-радиолокационных принципах дистанционного зондирования и обнаружения. При этом главной целью является создание электромагнитных приборов поиска двойного назначения в соответствии с армейскими требованиями инженерной разведки и обеспечением тактико-технических характеристик (ТТХ) приборов поиска во всех климатических регионах, в том числе в экстремальных погодных условиях.

Цель данной статьи – сравнительный анализ современного состояния разработок индукционных металлоискателей и перспективы развития электромагнитных методов и средств инженерной разведки минно-взрывных устройств в различных вмещающих средах.

Зарубежный опыт. К настоящему времени появилось большое количество разработок поисковых приборов (особенно за рубежом) хорошего качества, причем подавляющее большинство из них являются индукционными металлодетекторами двойного назначения, в том числе для решения гуманитарных задач инженерной разведки. Наилучшие профессиональные металлоискатели этого типа разработаны в следующих государствах и фирмах:

– США: «Fisher» с линейкой приборов F75, Gemini 3 и др.; «Garret Metal Detectors» с приборами: Garret Ace (250), Garret G112500, GTP 1350, GTAX 550 и др.; «Whites» с серией приборов типа Spectra V3, Spectrum DFX (XLTE), Tracker E – серия приборов, Matrix E – серия приборов и др.; «Tesoro Electronics» с приборами Compadre, Cortes и др.;

– Великобритания: «Spectrum» с линейкой приборов Spectra V3, Spectrum XLT, Spectrum DFX;

– Австралия: «Minelab» с разработкой технологии AGT (автоматическая настройка на грунт) и сериями приборов Explorer S (XSII), Explorer SE и с линейкой металлоискателей X-Terra 70, Eureka Gold, Explorer E-Track, Safari и др.;

– Франция: «XP» с серией металлоискателей Dens, Maxx Power, G-Maxx II, Adventis 2, ADX250 (150), в том числе с пультами дистанционного управления и беспроводными катушками и наушниками;

– ФРГ: «Forster» с линейкой приборов Minex R 4600, Minex R Software; «Lorenz Deepmax» с линейкой приборов Lorenz Deepmax X5/X6;

– Австрия: «Schiebel» с линейкой металлоискателей Mimid (AN/PS).

Металлоискатели перечисленных стран и фирм функционально считаются лучшими в мире и в наибольшей степени пригодны для решения гуманитарных задач инженерной разведки в реальных полевых условиях. При этом значительное число из перечисленных приборов (Mimid, «Schiebel») (Австрия); Garrett ATPRO (США); Kevlar-150 (Украина) и др.) являются одновременно и водолазными металлоискателями с рабочей глубиной погружения до 30–50 м. Кроме того, фирма «Forster» (одна из многих) разрабатывает и выпускает лучшие магнитометрические многоцелевые металлоискатели: Forex API, Forex DLGSTD КАРТО с чувствительностью от 3 до 10000 нТл с разрешением 0.3 нТл.

Практически все зарубежные индукционные металлоискатели, несмотря на конструктивные отличия, имеют близкие поисковые характеристики и обнаруживают «стандартный» набор объектов (мишеней) на соответствующих «штатных» глубинах. ТТХ металлоискателей приведены в сравнительной таблице.

Основными недостатками индукционных металлоискателей зарубежных фирм являются:

– избыточно широкие функциональные возможности и, как следствие, сложности в управлении и в принятии оператором решения;

– недостаточная электромагнитная совместимость с аналогичными приборами поиска.

В совокупности указанные недостатки снижают темп поиска в целом.

Состояние дел в России. В Советском Союзе разработки методов, подходов и средств инженерной разведки системно велись на высоком научно-техническом уровне по всем «электромагнитным» направлениям: индукционным, магнитометрическим, радиоволновым и нелинейно-радиолокационным. Все вызовы обеспечивались стратегическими, оперативными и тактическими НИОКР, широкой номенклатурой металлоискателей отечественного производства с качеством мирового уровня. В этот период одним из лидеров во всех направлениях разработок электромагнитных методов и средств дистанционной диагностики сред являлся Сибирский физико-технический институт им. В. Д. Кузнецова при ТГУ.

Работы велись системно начиная с 1936–1938 гг. [1–10]. Теоретической основой дальнейших разработок электромагнитных методов диагностики (и не только в СССР) явилась статья В.Н. Кессениха [1] и полученное в ней, в достаточно общей постановке, интегродифференциальное уравнение для плотности вихревых токов металлических тел, находящихся в однородном переменном электромагнитном поле:

$$\mathbf{j} = -i\sigma\omega\mathbf{A}_0 - i\sigma\omega\mu\int_{V} \frac{\mathbf{j}}{R_v} dV + \frac{\mu-1}{4\pi\mu} \int_S \frac{[\mathbf{n} \operatorname{rot} \mathbf{j}]}{R_S} dS,$$

где σ , μ – электропроводность и магнитная проницаемость тела; \mathbf{A}_0 , ω – вектор-потенциал и частота первичного поля; R_v , R_S – расстояния соответственно от элемента объема dV и площади dS до точки наблюдения.

Уравнение получено из системы уравнений Максвелла в приближении пренебрежения токами смещения. Полученное уравнение и изложенные в статье идеи были развиты в последующих многочисленных работах сотрудников СФТИ [2–7]. Теоретические и технические работы были направлены на создание аналитических методик вычисления изменения вторичных электромагнитных полей, их интерпретацию и регистрацию с помощью магнитометрических и вихретоковых преобразователей различного назначения.

Радиоволновые и нелинейно-радиолокационные методы дистанционной диагностики сред основаны на решении прямых и обратных задач излучения и рассеяния радиоволн с соответствующими граничными условиями для конкретной геометрии тел с использованием той или иной модели электропроводности контролируемых тел [8–10]. В нелинейной радиолокации электрически нелинейная проводимость моделируется обобщенной проводимостью в виде ряда Тейлора:

$$\Lambda(E) = \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n E^n,$$

где σ_n – коэффициент ряда; E – амплитуда зондирующего поля; n – порядок нелинейности.

Но чаще всего нелинейность моделируется той или иной аппроксимацией вольт-амперной характеристики для конкретного типа проводимости объекта.

Основные ГТХ отечественных и зарубежных индукционных металлоскателей

№ п/п	Сравнительные характеристики	СИМ-2, СФГИ, Россия	ИМПС, ТЗИА, Россия	ИМП-С2 «Ютта», Россия	Кондо, «АКА», Россия	Mimid, «Schiebel», Австрия	Compact F3, «Minelab», Австралия	Garrett, США	Fisher F70, США
1	Адаптация к вмещающим средам	Автоматическая	Автоматическая	Автоматическая	Автоматическая и регулируемая	Автоматическая	Автоматическая и регулируемая	Автоматическая и регулируемая	Автоматическая и регулируемая
2	Селективность	По трем классам: мелкие, средние, крупные	16 градаций		По массе и «цвету» металла	Ориентировочная	По массе и «цвету» металла	По массе и «цвету» металла	По массе и «цвету» металла
3	Дальность обнаружения, см:								
	Имитаторов про- тивотанковых мин типа ТМ-62М	55-60	>50	50	50-60	>50	>50	>50	>50
	Имитаторов противопехот- ных мин типа TS-50	14-16	12-14	5	>14	~5	>14	>14	>14
	ПИМН-2	20-23	~20	15	>20	16-18	>18	>18	>18
	ПФМН	18-20							
4	Работа в воде, м	До 1.0	До 1.0	До 1.0	До 1.0	До 30.0	До 5.0	До 5.0	
5	Интервал рабочих температур	От -40 до +50 °С	От -30 до +50 °С	От -50 до +50 °С	От -5 до +40 °С	От -30 до +60 °С	От -30 до +60 °С	От -30 до +60 °С	От -30 до +60 °С
6	Индикация	Звуковая, полифоническая	Звуковая, визуальная	Звуковая, визуальная	Звуковая, визуальная	Звуковая, визуальная	Звуковая, визуальная	Звуковая, визуальная	Звуковая, визуальная
7	Электропитание	9 В батарей, аккумуляторы типа АА	9 В батарей, аккумуляторы типа АА	9 В батарей, аккумуляторы типа АА	12 В батарей, аккумуляторы типа АА	6 В батарей, аккумуляторы типа «С»	6 В батарей, аккумуляторы типа «С»		
8	Время непрерывной работы от одного источника тока, ч	8	8	8	8-10	8-10	8-10	8-10	8-10
9	Тип конструкции	Блочно-разборная	Блочно-разборная, коммутационный кабель не защищен (снаружи)	Моноприбор, неразборная, складная, кабель частично в штанге	Моноприбор, неразборная, складная, кабель снаружи	Моноприбор, неразборная, складная, кабель в штанге	Моноприбор, неразборная, складная, кабель снаружи	Моноприбор, неразборная, складная, кабель снаружи	Моноприбор, неразборная, складная, кабель снаружи
10	Масса изделия в рабочем положении, кг	~1.3	~3.0	2.7	~1.5	1.3	>2.0	>2.0	>2.0

НИОКР как научного, так и технического плана велись в сотрудничестве с Томским КБ «Проект» и Томским заводом измерительной аппаратуры (ТЗИА). Значительная часть совместных разработок пошла в серию и до сих пор состоит на снабжении (индукционные миноискатели ИМП, МИВ, ИМПС и др.) в российской армии. Это разработки 90-х годов XX века и, несмотря на их высокий профессионально-технический уровень (таблица), они морально и физически устарели, необходима их модификация.

В настоящее время, как и прежде, в СФТИ ТГУ продолжают развиваться НИОКР по разработке методов, систем и приборов поиска металлосодержащих объектов в различных вмещающих средах по следующим основным направлениям: индукционное, радиоволновое и нелинейной радиолокации. За последние 5 лет в СФТИ ТГУ разработан ряд селективных индукционных металлоискателей «Шип», СИМ-1, СИМ-2 [10] с тактико-техническими и эксплуатационными характеристиками на уровне лучших зарубежных аналогов (таблица). Алгоритм обработки сигналов с вихретокового преобразователя основан на использовании особенностей амплитудно-временных характеристик затухающих переходных процессов магнитных полей вихревых токов металлосодержащих включений. При этом конструкция изделия СИМ-2 выполнена блочно-разборной, с использованием аддитивной 3D-принтерной технологии из пластмассы.

В последние 10–15 лет в России появился ряд разработчиков и фирм-изготовителей индукционных металлоискателей, что позволяет надеяться на дальнейшее развитие электромагнитных методов и средств дистанционной диагностики различных сред, и в первую очередь для гуманитарных целей инженерной разведки. Наиболее известные из них «СТТ Групп» (г. Москва), объединяющая несколько фирм-разработчиков специального оборудования различного назначения, включая металлоискатели и досмотровое оборудование; ЗАО «Группа Защиты – «Ютта» (г. Москва) с конструктивной модификацией известных индукционных и нелинейно-радиолокационных обнаружителей – ИМП-С2, NR-900. NR-коршун; «АКА-Контроль» (г. Москва) с линейкой металлоискателей Вектор 7262, Кондор, Сигнум SFT и др.; «Логис-Геотех» (г. Москва) с радарными подповерхностными зондирования (ППО-2) и др.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что имеющийся научный и интеллектуальный потенциал России позволяет создать в ближайшее время научно-технологическую основу производства нового поколения качественных электромагнитных средств дистанционной инженерной разведки. Приоритетными направлениями разработок являются:

- разработка многоканальных технических средств на основе комплексирования различных физических принципов в одном поисковом устройстве;
- разработка наземно-водолазных (универсальных) индукционных металлоискателей;
- разработка сверхширокополосных радиоволновых систем поиска и обнаружения с 3D-визуализацией локальных неоднородностей в слабопроводящих вмещающих средах;
- разработка портативных нелинейно-радиолокационных систем обнаружения, позиционирования и функционального вывода из строя обнаруженных несанкционированных электрически нелинейных объектов.

При этом приборы перечисленных направлений должны обеспечиваться системой дублирующей синхронной индикации (звуковой, полифонической, визуальной, сенсорной и т.д.) и режимом автоматического принятия решения при технологичности изготовления и простоте работы с ним.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кессених В.Н. // ЖЭТФ. – 1938. – Т. 8. – Вып. 5. – С. 532–554.
2. Бюлер Г.А. // Труды СФТИ. – 1948. – Вып. 26. – С. 212–224.
3. Шилов Н.М. // ЖТФ. – 1940. – Т. 10. – Вып. 9. – С. 695–709.
4. Сапожников А.Б. // Труды СФТИ. – 1950. – Вып. 30. – С. 3–11.
5. Бюлер Г.А., Сапожников А.Б., Семенов В.С. // Труды СФТИ. – 1976. – Вып. 61. – С. 15–22.
6. Сапожников А.Б., Радучин О.К., Боброва М.Н. // Изв. вузов. Физика. – 1969. – Т. 12. – № 7. – С. 31–36.
7. Рябцев А.П., Фрумкис Л.С. // Электромагнитные методы исследования и контроля материалов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1977. – С. 32–33.
8. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я., Клоков А.В. Радиоволновая томография. – Томск: Изд-во НТЛ, 2014. – 264 с.

9. Парватов Г.Н., Попов А.А. // Электромагнитные методы измерения и контроля. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1982. – С. 59–67.
10. Парватов Г.Н., Потехаев А.И., Светличный В.А., Сынков С.А., Сайфутдинов Р.Ф., Яковлев И.А., Яковлева С.В., Замбалов С.Д. Селективный индукционный металлоискатель // Патент № 2015116811, Россия. Дата приоритета 05.05.2015.

¹ Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова
Томского государственного университета, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 14.07.17.

² АО «Научно-исследовательский инженерный институт», г. Балашиха, Россия

Потехаев Александр Иванович, д.ф.-м.н., профессор, директор, e-mail: potekaev@spti.tsu.ru;
Донченко Валерий Алексеевич, д.ф.-м.н., профессор, зам. директора, e-mail: don@spti.tsu.ru;
Замбалов Сергей Доржиевич, к.ф.-м.н., инженер-исследователь, e-mail: zambalovsd@gmail.com;
Парватов Георгий Николаевич, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр., e-mail: georgpa@yandex.ru;
Смирнов Игорь Михайлович, д.т.н., ген. директор, e-mail: pochta@aoniii.ru;
Светличный Валерий Анатольевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией, e-mail: v_svetlichnyi@bk.ru;
Якубов Владимир Петрович, д.ф.-м.н., профессор, зав. отделом, e-mail: yvlp@mail.tsu.ru;
Яковлев Игорь Александрович, к.ф.-м.н., инженер-исследователь, e-mail: yakovlev-i-a@yandex.ru.