ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО АППАРАТУРНОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАЛОГЛУБИННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Е.В. Балков, Д.И. Фадеев

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
e-mail: BalkovEV@ipgg.sbras.ru*

Для исследования первых десяти метров грунта наиболее широко применяются приборы, работающие в частотной области. Компактность, скорость работы, простота эксплуатации такой аппаратуры, а также качество получаемой информации обуславливают ее применимость для решения широкого круга вопросов: от поиска локальных объектов, до выделения структурных особенностей верхней части разреза. В статье представлен обзор актуальных аппаратных и программных разработок для малоглубинных электромагнитных зондирований в частотной области. Приведено описание всех разновидностей бесконтактной аппаратуры основных мировых производителей. Выделены особенности как самих аппаратных средств, так и подходов к их реализации. Рассмотрены методы первичной обработки и инверсии данных. Сделаны выводы о необходимости поиска новых путей устранения недостатков аппаратуры.

Электромагнитные зондирования в частотной области, малоглубинная электроразведочная аппаратура, компактные геофизические приборы

OVERVIEW OF MODERN HARDWARE AND SOFTWARE FOR NEAR SURFACE ELECTROMAGNETIC SOUNDING IN THE FREQUENCY DOMAIN

E.V. Balkov, D.I. Fadeev

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: BalkovEV@ipgg.sbras.ru*

For the study of the first ten meters of the ground, instruments operating in the frequency domain are most widely used. The compactness, speed of operation, ease of operation of such equipment, as well as the quality of the information obtained, determine its applicability for solving a wide range of issues: from searching for local objects to identifying structural features of the upper part of the section. The article provides an overview of current hardware and software developments for near surface electromagnetic soundings in the frequency domain. A description of all types of non-contact equipment from major world manufacturers is given. The features of both the hardware itself and the approaches to their implementation are described. Methods of primary processing and data inversion are considered. Conclusions are drawn about the need to find new ways to eliminate of equipment deficiencies.

Electromagnetic sounding in the frequency domain, near surface electrical survey equipment, compact geophysical instruments

Сегодня во всем мире для решения задач малоглубинной геофизики широко применяется индукционное зондирование и профилирование. Аппаратура, работающая во временной области и реализующая метод переходных процессов, применяется в основном для исследования первых десятков и сотен метров, например: [Секачев и др., 2006; Тригубович и др., 2006, 2009]. Для исследования первых десяти метров грунта наиболее широко применяются приборы, работающие в частотной области. Компактность, скорость работы, простота эксплуатации такой аппаратуры, а также качество получаемой информации обуславливают ее применимость для решения широкого круга вопросов: от поиска локальных объектов до выделения структурных особенностей верхней части разреза. Методы электромагнитного частотного или геометрического зондирования весьма популярны при решении задач в таких областях, как инженерная геофизика, археология, экология, точное земледелие и т. п. Целью представленной работы является обзор современных технологических решений в области электромагнитных исследований малых глубин, выделение границ применения и особенностей конкретных разработок, анализ имеющегося программного обеспечения, систематизирование имеющихся подходов к реализации компактной аппаратуры индукционных исследований. Это позволит выделить перспективные и тупиковые направления развития технологии.

Среди компактных устройств для выполнения малоглубинного электромагнитного зондирования известна российская аппаратура ЭМС [Манштейн и др., 2000; Manshtein et al., 2003] и зарубежная, как, например, GEM-2, DUALEM, CDM-Explorer [Won et al., 1996; Taylor, 2000]. Широко распространена зарубежная аппаратура для электромагнитного профилирования: EM31, EM38, EMP-400, CMD [McNeill, 1980a, b]. Разработчики (табл. 1) указанной аппаратуры используют разное количество, ориентацию и расположение катушек.

Таблица 1

Контактная информация известных разработчиков малоглубинной аппаратуры для электромагнитного зондирования и профилирования

№	Разработчик	Место нахождения	Интернет-сайт
1	Geophex Ltd.	Рэли, Северная Каролина, США	http://www.geophex.com
2	ИНГГ СО РАН	Новосибирск, Россия	http://www.ipgg.sbras.ru
3	DuaLEM Inc.	Милтон, Онтарио, Канада	http://www.duaLEM.com/
4	Geonics Ltd.	Миссисауга, Онтарио, Канада	http://www.geonics.com
5	GSSI Inc.	Нашуа, Нью-Гэмпшир, США	http://www.geophysical.com
6	GF Instruments s.r.o.	Брно, Чехия	http://www.gfinstruments.cz
7	IRIS Instruments	Орлеан, Франция	http://www.iris-instruments.com/

Известны как двух-, так и многокатушечные (до 7 штук) приборы с компланарной и ортогональной ориентацией генераторной и измерительных катушек (рис. 1).

Рис. 1. Типы компоновки компактной малоглубинной аппаратуры индукционного зондирования и профилирования

Основные характеристики аппаратуры, находящиеся в открытом доступе, сведены в табл. 2. При этом эффективная глубина рассчитывается для компланарных, ориентированных в горизонтальной плоскости катушек, так, как это сделано, например, в работах [McNeill, 1980a, b; Callegary et al., 2007]: та часть среды, которая находится выше эффективной глубины, обеспечивает 70 % полезного сигнала, а для случая компланарных катушек, ориентированных в вертикальной плоскости (т. е. ортогонально земной поверхности), эффективная глубина вдвое меньше. Для случая ортогонально ориентированных катушек в аппаратуре Dualem (см. рис. 1) эффективная глубина уменьшается втрое [Taylor, 2000].

Вся аппаратура данного класса является портативной, управляется, как правило, одним оператором с помощью контроллера, имеющего кнопочный, сенсорный и графический интерфейсы. Большинство производителей комплектует свою аппаратуру профессиональными контроллерами на базе мобильных устройств – карманных персональных компьютеров (КПК) под управлением операционной системы (ОС) Windows CE или Windows Mobile (табл. 3). Некоторые из разработчиков используют специализированные модули управления с графическими или текстовыми монохромными дисплеями.

Мобильные контроллеры, рекомендуемые к использованию производителями (см. табл. 3), могут иметь встроенные или подключаемые системы спутникового позиционирования GPS для автоматической привязки измерений к местности. Для контроллеров со стандартной ОС производители выпускают соответствующее программное обеспечение, имеющее визуальный интерфейс для управления аппаратурой, создания систем наблюдения, контроля измеряемых сигналов и первичной обработки данных (см. табл. 3). Для последующего анализа, обработки, интерпретации и оформления данные передаются на персональный компьютер (ПК). Некоторые производители предоставляют собственное

специализированное ПО для обработки и интерпретации данных, другие – лишь передают на ПК файлы стандартных форматов и рекомендуют использовать стороннее ПО (см. табл. 3).

Таблица 2

Характеристики малоглубинных приборов для электромагнитного зондирования и профилирования

№	Тип	Наименование аппаратуры	Частотный диапазон, кГц	Разнос между генераторной и приемной катушками, м	Эффект. глубина***	Разработчик
1	a	GEM-2	0.03–90	1.68	**	Geophex Ltd.
2	****	GEM-3	0.03–90	концентр.	**	Geophex Ltd.
3	****	GEM-3 Array	0.03–90	концентр.	**	Geophex Ltd.
4	****	GEM-5	0.03–90		**	Geophex Ltd.
5	****	GEM-5 Array	0.03–90		**	Geophex Ltd.
6	a	ЭМС	2.5–250	1.5*; 2.5	1-5	ИНГГ СО РАН
7	b	Dualem-1	9	1	1.5	Dualem Inc.
8	b	Dualem-2	9	2	4	Dualem Inc.
9	b	Dualem-21	9	1; 2	**	Dualem Inc.
10	b	Dualem-4	9	4	6	Dualem Inc.
11	b	Dualem-42	9	2; 4	6	Dualem Inc.
12	c	EM31-MK2	9.8	3.66	6	Geonics Ltd.
13	c	EM31-SH	9.8	2	4	Geonics Ltd.
14		EM34-3	0.4–6.4	10–40		Geonics Ltd.
15		EM34-3XL	0.4–6.4	10–40		Geonics Ltd.
16	c	EM38-MK2-1	14.5	1	0.75	Geonics Ltd.
17	c	EM38-MK2	14.5	0.5; 1	0.3; 0.75	Geonics Ltd.
18	c	EMP-400	1.0–16	1.21	**	GSSI Inc.
19	c	CMD-Explorer	**	1.48; 2.82; 4.49	2.3; 4.2; 6.7	GF
20	c	CMD-Mini Explorer	**	0.32; 0.71; 1.18	0.5; 1; 1.8	GF
21	c	CMD-Mini Explorer 6L	**	0.2; 0.33; 0.5; 0.72; 1.03; 1.5	0.3; 0.5; 0.8; 1.1; 1.6; 2.3	GF Instruments
22	c	CMD Tiny	**	0.45	0.7	GF
23	c	CMD 1	10	0.98	1.5	GF
24	c	CMD 2	10	1.89	3	GF
25	c	CMD 4	10	3.77	6	GF
26	c	CMD 4/6	**	3.77; 5.79	9	GF
		CMD-DUO	**	10–40		GF
27	b	PROMIS 10				IRIS
<p>* расстояние между компенсационной и генераторной катушкой не ** указано производителем *** эффективная глубина, рассчитанная для горизонтального копланарного расположения катушек (режим Mz-Hz) **** концентрическая или осевая схема расположения катушек</p>						

Таблица 3

Рекомендуемые устройства и программное обеспечение для управления сбором, обработки, инверсии и визуализации данных известной аппаратуры малоглубинного электромагнитного зондирования и профилирования

Разработчик аппаратуры	Терминал управления, тип операционной системы	ПО управления прибором	ПО для обработки результатов измерения	ПО для визуализации	ПО для инверсии данных
Geophex	HP Ipaq; ОС Win CE	WinceGEM	–	GS Surfer, Oasis montaj	nLayerGEM2
ИНГГ	Произвольный под управлением Win CE, Win Mobile и т.п.	EMSControl	ISystem	GS Grapher, GS Surfer, GS Voxler	EMS v.2.0
Dualem	Произвольный под управлением Win CE, Win Mobile и т.п.	–	–	–	–
Geonics	Trimble Juno, Trimble TDS Recon, Juniper Archer, Juniper Allegro.Win CE, Win Mobile.	Track и RTMap (Geomar Software Inc.)	–	GS Surfer, Oasis montaj	IX1D (Interprex), Emigma, Aarhus Workbench
GSSI	Trimble TDS Recon, Win Mobile	MagMap2000 (Geometrics)	TerraSurveyor, ArcheoSurveyor (DW Consulting)	TerraSurveyor, ArcheoSurveyor (DW Consulting)	–
GF Instruments	Специализированный модуль управления	графический монохромный дисплей	–	GS Surfer	IX1D (Interprex)
IRIS Instruments	Специализированный модуль управления	текстовый монохромный дисплей	EMSYS	–	IX1D (Interprex)

Широко известная своими научно-техническими разработками американская компания **Geophex Ltd** (см. табл. 1) специализируется на разработке аппаратуры, работающей в частотной области, для воздушных, наземных и подводных исследований электромагнитными методами. В 1996 году из публикации [Won et al., 1996] стала известна аппаратная разработка GEM-2 (рис. 2) – это многочастотный трехкатушечный прибор (см. табл. 2, рис. 1) с одной генераторной и двумя приемными катушками, включенными на разность так, чтобы компенсировать прямое поле генератора. При этом все катушки прибора разнесены и расположены в одной горизонтальной плоскости (см. рис. 1). Это первый широко известный зарубежный портативный прибор малоглубинного частотного электромагнитного зондирования. В следующем году публикуется статья [Won et al., 1997] о приборе GEM-3, компактном многочастотном (см. табл. 2) трехкатушечном зонде с совмещенными катушками: одной генераторной и двумя включенными на разность приемными катушками (см. рис. 2).

К настоящему времени на базе описанных разработок компанией Geophex Ltd выпускается широкая линейка устройств для воздушной, наземной и подводной съемки (см. рис. 2, табл. 2). Подробное описание устройств для воздушной и подводной съемки можно найти на сайте компании (см. табл. 1). Коллектив компании широко опубликовал свои теоретические исследования в области обработки, инверсии и интерпретации данных электромагнитного профилирования и частотного зондирования [Huang and Fraser, 1996, 1998–2003; Huang and Won, 2003]. Опубликован также ряд работ о практическом использовании, оценке глубинности и ограничениях разрабатываемых приборов при выполнении малоглубинного частотного зондирования [Huang, 2005; Huang et al., 2008].

Рис. 2. Модификации аппаратуры компании Geophex Limited (США) для малоглубинного частотного электромагнитного зондирования и электромагнитного профилирования

Широко известна в мире геофизическими аппаратными разработками американская компания **GSSI** (см. табл. 1). С начала 2000-х годов компанией продвигается на рынке многочастотная двухкатушечная аппаратура EMP-400 (см. рис. 2, табл. 2) для электромагнитного профилирования [Ortuani et al., 2015]. Аппаратура имеет удачное исполнение в виде легкого пластикового корпуса, симметрична, удобна в эксплуатации (рис. 3).

Рис. 3. Аппаратура EMP-400 для малоглубинного электромагнитного профилирования (GSSI, США)

Рис. 4. Аппаратура ЭМС для малоглубинного электромагнитного частотного зондирования и электромагнитного профилирования (разработка Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия)

Широко известна и апробирована российская аппаратная разработка **ЭМС** [Манштейн и др., 2000, 2008, 2012] для электромагнитного профилирования и малоглубинного частотного зондирования (рис. 4). Аппаратура представляет собой трехкатушечный зонд с тремя разнесенными вертикальными магнитными диполями. С помощью генераторной катушки в грунте последовательно возбуждается гармоническое магнитное поле с частотами от 2,5 до 250 кГц. Магнитные моменты приемных катушек имеют противоположные направления, и отклик от среды регистрируется в виде разности э.д.с., индуцированных в приемных катушках, что позволяет скомпенсировать прямое поле генераторной катушки не менее чем в 1000 раз. С точностью не хуже 5 % регистрируются сигналы диапазона от 1 до 300 мкВ. Схема и назначение катушек аппаратуры ЭМС аналогична описанному выше устройству GEM-2. Однако аппаратура ЭМС имеет ряд преимуществ по сравнению с устройством GEM-2, выгодно отличается от него: имеет больший разнос, оперирует на более высоких частотах, имеет оригинальный колебательный генераторный контур и запатентованную конструкцию приемных катушек с ферритовым сердечником, что существенно увеличивает зондирующую способность и область применения.

Наибольшее распространение и мировую известность получили аппаратные разработки для электромагнитного профилирования канадской фирмы **Geonics Limited** (см. табл. 1), организованной в

1962 г. В 1976 г. разработана и выведена на рынок наиболее известная аппаратура EM31 (рис. 5). Компанией во главе с J.D. McNeill опубликовано теоретическое обоснование применения этой аппаратуры в условиях ближней зоны и способов обработки сигналов электромагнитного профилирования [McNeil, 1980a, b, 1983, 1996]. Указанные исследования в части теории электромагнитных полей и их асимптотических разложений базируются на результатах G.V. Keller и А. Кауфмана [Keller, Frischknecht, 1966; Kaufman, Keller, 1983]. На сайте компании (см. табл. 1) приведена обширнейшая библиография по истории применения аппаратных разработок. К настоящему времени компанией Geonics Limited выпущен ряд модификаций аппаратуры для электромагнитного профилирования на базе разработок EM31 и EM38 (см. рис. 5, табл. 2). Ниже дается описание аппаратной разработки для электромагнитного геометрического зондирования этой компании. Аппаратура управляется с помощью мобильных промышленных контроллеров *allegro* и *archer* (см. рис. 5) с использованием ОС Windows Mobile.

Рис. 5. Модификации аппаратуры для электромагнитного профилирования компании Geonics Limited (Канада)

На рынке также представлена линейка оборудования для электромагнитного профилирования и геометрического зондирования **DUALEM** одноименной канадской компании (см. табл. 1): производятся и используются многокатушечные устройства с компланарной и ортогональной конфигурацией катушек в различных модификациях (см. рис. 1, 6). За счет набора приемных катушек и их различной пространственной ориентации (см. табл. 2) выполняется зондирование [Taylor, 2000; Taylor, Holladay 2011].

Рис. 6. Модификации аппаратуры для малоглубинного электромагнитного геометрического зондирования и электромагнитного профилирования компании DUALEM (Канада)

Среди компаний-разработчиков выделяется чешский производитель **GF Instruments** (см. табл. 1), который выпускает наиболее широкую линейку аппаратуры для наземного электромагнитного профилирования и геометрического зондирования (рис. 7). В основе своих разработок эта компания, аналогично Geonics, использует компланарную двухкатушечную схему, предлагая потребителям широкий выбор разносов между катушками, а также конфигурации с несколькими приемными катушками (см. рис. 1, табл. 2) [Andrade, Fischer, 2018].

Вся разрабатываемая аппаратура оперирует, по заявлениям производителя, в рамках ближней зоны, и для обработки применяются соответствующие линейные асимптотики. Компания выпускает собственный универсальный контроллер (см. рис. 7) с монохромным графическим интерфейсом. Для обработки, интерпретации и оформления рекомендуется использовать стороннее ПО (см. табл. 3).

Рис. 7. Модификации аппаратуры для электромагнитного геометрического зондирования и электромагнитного профилирования компании GF Instruments (Чехия)

Кроме аппаратуры с фиксированной базой между генераторной и приемными катушками рядом производителей разработаны приборы для электромагнитного геометрического зондирования с переменной базой (рис. 8).

Рис. 8. Модификации аппаратуры для электромагнитного геометрического и частотного зондирования зарубежных компаний Geonics Limited (Канада), GF Instruments (Чехия) и IRIS Instruments (Франция)

Компании Geonics Limited и GF Instruments выпускают схожую по характеристикам аппаратуру EM34 и CMD-DUO соответственно. Устройства состоят из параллельных генераторной и приемной антенн, переносятся двумя операторами, позволяют выбирать разнос и ориентацию антенн (вертикальную либо горизонтальную). За счет изменения разноса, рабочей частоты и ориентации меняется глубина исследования и выполняется зондирование. Компанией IRIS Instruments разработана аппаратура PROMIS 10 для измерения трех ортогональных компонент электромагнитного поля (рис. 8). Для обработки и инверсии данных рекомендуется использовать стороннее ПО (см. табл. 3).

Для проектирования систем наблюдения, управления процессом измерения, первичной обработки и визуализации данных производители аппаратуры разрабатывают собственное ПО либо рекомендуют использовать стороннее. Так, компания Geonics Limited применяет промышленные контроллеры типа Trimble и Jupiter (см. табл. 3) с установленным ПО компании GEOMAR Software Inc (рис. 9) для просмотра в режиме реального времени профильных диаграмм сигнала, а также планиграфической поточечной визуализации. ПО для аппаратуры EMP-400 и GEM-2 также разработано для поточечной двумерной визуализации результатов с постобработкой и сглаживанием до двумерных карт (см. рис. 9).

Рис. 9. Программное обеспечение для управления аппаратурой EM31, EMP-400, GEM-2, синхронизации со спутниковыми координатами, сбора и визуализации данных в реальном времени компаний Geonics (Канада), GSSI (США), Geophex (США)

Для инверсии данных частотных и геометрических зондирований зарубежные производители аппаратуры (см. табл. 1) рекомендуют использовать стороннее ПО (см. табл. 3). ПО имеет визуальный графический и табличный оконный интерфейс (рис. 10), позволяет проводить анализ профильных диаграмм и кривых зондирования, одномерную инверсию данных. К расширенным возможностям программы Aarhus Workbench (см. рис. 10, снизу) относится возможность проводить одновременную инверсию данных набора пикетов зондирования с введением условий сопряжения на соседние модели – laterally constrained inversion [Auken et al., 2005]. Опубликованы результаты исследований, подтверждающие эффективность подхода латерально сопряженной инверсии синтетических и экспериментальных данных для различных геофизических методов [Auken et al., 2005; Wisén et al., 2005; Christiansen et al., 2007; Santos et al., 2010; Triantafyllis, Santos, 2011].

Рис. 10. Интерфейс зарубежного программного обеспечения для инверсии данных частотного и геометрического зондирования: IX1D компании Interperex (вверху), Aarhus Workbench университета Aarhus (внизу)

А.Е. Каминским разработано специализированное ПО Nemfis1D для одномерной инверсии данных аппаратуры ЭМС (<http://zond-geo.com>). Программа имеет развитый графический оконный интерфейс (рис. 11), включает графический и табличный интерфейс для инверсии данных одного зондирования, позволяет проводить попикетную инверсию профильных данных с возможностью визуализации псевдоразрезов и разрезов, состоящих из набора одномерных слоистых моделей.

В ИНГГ СО РАН разработано специализированное универсальное ПО EMS Control для мобильных контроллеров под управлением ОС Windows Mobile для аппаратуры ЭМС [Балков, Адайкин, 2008; Балков и др., 2015]; разработаны программы ISystem, EMS v2.0 для предварительной обработки, трансформации и одномерной инверсии сигналов ЭМС [Балков, 2009; Эпов и др., 2018].

Рис. 11. Интерфейс программы Nemfis1D для одномерной инверсии данных аппаратуры ЭМС (А. Каминский, <http://zond-geo.com>)

Известен цикл аппаратурных и методических разработок коллектива из Института геофизики УрО РАН А.И. Человечкова, А.Н. Ратушняка, Б.М. Чистосердова, С.В. Байдикова и др. [Человечков, Чистосердов, 2000; Иванов, Человечков, 2001; Человечков и др., 2003; Чистосердов и др., 2004а, б; Байдилов и др., 2005; Человечков и др., 2007, 2011, 2012; Байдилов, Человечков, 2011]. Оригинальные способы и устройства, предложенные авторами, основаны на индукционном возбуждении переменного электромагнитного поля и многокомпонентной регистрации отклика от среды для изучения первых десятков и сотен метров.

ВЫВОДЫ

Несмотря на широкое распространение и долгую историю применения описанных аппаратурных разработок остается нерешенным ряд недостатков. Если не выполняется компенсация прямого поля (двухкатушечный зонд), то это уменьшает информативность сигнала, так как сигнал от первичного поля (генераторная петля) выступает в качестве помехи. Компенсация первичного поля в таких устройствах, как GEM-2 (разработка американской фирмы Georhex) и ЭМС (разработка ИНГГ СО РАН) [Манштейн и др., 2008], выполняется за счет использования компенсационной катушки [Won et al., 1996] (см. рис. 1). Из-за сложностей настройки [Манштейн и др., 2012], появления ложных аномалий [Балков, 2011; Балков, Стойкин, 2011], характерных для трех-катушечных зондов, актуальным остался вопрос о нахождении альтернативного метода компенсации прямого поля.

К перспективным направлениям развития метода, также следует отнести применение беспилотного летательного аппарата для проведения электромагнитных исследований. Использование беспилотного летательного аппарата для переноски аппаратуры позволяет оператору охватывать

большие территории, проводить съемку в районах, которые не проходимы для наземных транспортных средств, или обследовать участки неустойчивой местности, слишком опасные для пилотируемых операций.

ЛИТЕРАТУРА

Байдиков С.В., Иванов Н.С., Ратушняк А.Н., Уткин В.И., Человечков А.И. Способ геоэлектроразведки: пат. 2250479 Российская федерация, МПК G01V 3/08; Заявитель и патентообладатель ИГФ УрО РАН; заявл. 25.10.2002, опубл. 20.04.2005. – 2005. – Бюл. № 11. – 11 с.

Байдиков С.В., Человечков А.И. Аппаратура для индукционных зондирований МЧЗ-8 // Уральский геофизический вестник. – 2011. – № 1 (18). – С. 4–8.

Балков Е.В. Малоглубинное частотное зондирование в реальном времени: аппаратура и программное обеспечение [Электронный ресурс] // IV Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли (Москва, 1–4 сентября 2009 г.): Тез. докл. – М., 2009. – 2 с.

Балков Е.В. Множественные образы в сигнале от локальных объектов при электромагнитном профилировании компактным зондом с разнесенными катушками [Электронный ресурс] // Всероссийская школа-семинар имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли (СПб., 16–21 мая 2011 г.): расш. тез. докл. – Санкт-Петербург, 2011. – 4 с.

Балков Е.В., Адайкин А.А. Управление аппаратурой частотного электромагнитного зондирования с помощью карманного компьютера // Геоинформатика. – 2008. – № 4. – С. 33–38.

Балков Е.В., Стойкин Т.А. Малоглубинное частотное зондирование при поиске локальных проводящих мишеней // VII Международная выставка и научный конгресс «ГЕО-Сибирь-2011» (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.): Сб. материалов. – Новосибирск, 2011. – Т. 2, № 1. – С. 179–185.

Балков Е.В., Манштейн Ю.А., Панин Г.Л., Белобородов В.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ EMS Control. Свидет. о регистр. прогр. № 2015616582; RU; № 2014663924, заявл. 29.12.2014, опубл. 15.06.2015.

Иванов Н.С., Человечков А.И. Способ геоэлектроразведки: пат. 2172499 Российская федерация, МПК G01V 3/08; Заявитель и патентообладатель ИГФ УрО РАН; заявл. 13.06.2000, опубл. 20.08.2001.

Манштейн А.К., Эпов М.И., Воевода В.В., Сухорукова К.В. Способ индукционного частотного зондирования: пат. 2152058 Российская федерация, МПК G01V 3/10; заявитель и патентообладатель ИНГГ СО РАН; заявл. 24.06.1998, опубл. 27.06.2000. – 2000. – Бюл. № 18. – 4 с.

Манштейн А.К., Панин Г.Л., Тикунов С.Ю. Аппаратура частотного электромагнитного зондирования “ЭМС” // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49, № 6. – С. 571–579.

Манштейн А.К., Эпов М.И., Балков Е.В., Сухорукова К.В. Способ калибровки устройства для наземного электромагнитного индукционного частотного зондирования: пат. 2461850 Российская Федерация, МПК G01V 13/00 (2006.01), заявитель и патентообладатель ИНГГ СО РАН, № 2010126402/28; заявл. 28.06.2010; опубл. 20.09.2012. – 2012. – Бюл. № 26. – 5 с.

Секачев М.Ю., Балашов Б.П., Саченко Г.В., Вечканов О.П., Захаркин А.К., Тарло Н.Н., Могилатов В.С., Злобинский А.В. Аппаратурный электроразведочный комплекс “Цикл-7” // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – № 1. – С. 44–46.

Тригубович Г.М., Персова М.Г., Балыбердин А.Л. Телеметрическое электроразведочное оборудование серии «Импульс» для 3D-электроразведки на плотных пространственно-временных сетях наблюдений // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – Т. 2, № 16. – С. 22–25.

- Тригубович Г.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г.** 3D-электроразведка становлением поля. – Новосибирск: Наука, 2009. – 222 с.
- Человечков А.И., Чистосердов Б.М.** Способ индукционного вертикального зондирования: пат. 2156987 Российская федерация, МПК G01V 3/08; Заявитель и патентообладатель ИГФ УрО РАН; заявл. 13.10.1998, опубл. 27.09.2000.
- Человечков А.И., Коноплин А.Д., Иванов Н.С., Астафьев П.Ф., Вишнев В.С., Дьяконова А.Г.** Измерительное устройство для геоэлектроразведки: пат. 2207596 Российская федерация, МПК G01V 3/08; Заявитель и патентообладатель ИГФ УрО РАН; заявл. 20.07.2001, опубл. 27.06.2003.
- Человечков А.И., Байдилов С.В., Ратушняк А.Н., Чистосердов Б.М.** Способ геоэлектроразведки: пат. 2302018 Российская федерация, МПК G01V 3/08; Заявитель и патентообладатель ИГФ УрО РАН; заявл. 21.06.2005, опубл. 27.06.2007. – 2007. – Бюл. № 18. – 15 с.
- Человечков А.И., Ратушняк А.Н., Байдилов С.В., Астафьев П.Ф.** Способ геоэлектроразведки: пат. 2410730 Российская федерация, МПК G01V 3/16; Заявитель и патентообладатель ИГФ УрО РАН; заявл. 16.09.2008, опубл. 27.01.2011. – 2011. – Бюл. № 3. – 11 с.
- Человечков А.И., Байдилов С.В., Давыдов В.А., Журавлева Р.Б.** Способ геоэлектроразведки: пат. 2460097 Российская федерация, МПК G01V 3/08; Заявитель и патентообладатель ИГФ УрО РАН; заявл. 12.05.2010, опубл. 27.08.2012. – 2012. – Бюл. № 24. – 8 с.
- Чистосердов Б.М., Человечков А.И., Байдилов С.В.** Способ индукционного вертикального зондирования: пат. 2230341 Российская федерация, МПК G01V 3/08; Заявитель и патентообладатель ИГФ УрО РАН; заявл. 10.12.2002, опубл. 10.06.2004. – 2004а.
- Чистосердов Б.М., Человечков А.И., Байдилов С.В.** Способ индукционного вертикального зондирования // Уральский геофизический вестник. – 2004б. – № 1 (6). – С. 112–114.
- Эпов И.Н., Ельцов И.Н., Антонов А.А., Власов Е.В., Балков Е.В., Фаре А.Н.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ EMS v.2.0. // Св-во о регистр. прогп. № 2018614716; RU; № 2018610657, заявл. 25.01.2018, опубл. 17.04.2018.
- Andrade F.C.M., Fischer T.** Generalised relative and cumulative response functions for electromagnetic induction conductivity meters operating at low induction numbers // *Geophysical Prospecting*. – 2018. – Vol. 66 (3). – P. 595–602, doi: 10.1111/1365-2478.12553.
- Auken E., Christiansen A.V., Jacobsen B.H., Foged N., Sørensen K.I.** Piecewise 1D laterally constrained inversion of resistivity data // *Geophysical Prospecting*. – 2005. – Vol. 53 (4). – P. 497–506, doi: 10.1111/j.1365-2478.2005.00486.x.
- Callegary J.B., Ferré T.P.A., Groom R.W.** Vertical spatial sensitivity and exploration depth of low-induction-number electromagnetic-induction Instruments // *Vadose Zone Journal*. – 2007. – Vol. 6 (1). – P. 158–167, doi: 10.2136/vzj2006.0120.
- Christiansen A.V., Auken E., Foged N., Sørensen K.I.** Mutually and laterally constrained inversion of CVES and TEM data: a case study // *Near Surface Geophysics*. – 2007. – Vol. 5 (2). – P. 115–123, doi: 10.3997/1873-0604.2006023.
- Huang H.** Depth of investigation for small broadband electromagnetic sensors // *Geophysics*. – 2005. – Vol. 70 (6). – P. G135–G142, doi: 10.1190/1.2122412.
- Huang H., Fraser D.C.** The differential parameter method for multifrequency airborne resistivity mapping // *Geophysics*. – 1996. – Vol. 61 (1). – P. 100–109, doi: 10.1190/1.1574674.

- Huang H., Fraser D.C.** Magnetic permeability and electrical resistivity mapping with a multifrequency airborne EM system // *Exploration Geophysics*. – 1998. – Vol. 29 (1–2). – P. 249–253, doi: 10.1071/EG998249.
- Huang H., Fraser D.C.** Airborne resistivity data leveling // *Geophysics*. – 1999. – Vol. 64 (2). – P. 378–385, doi: 10.1190/1.1444542.
- Huang H., Fraser D.C.** Airborne resistivity and susceptibility mapping in magnetically polarizable areas // *Geophysics*. – 2000. – Vol. 65 (2). – P. 502–511, doi: 10.1190/1.1444744.
- Huang H., Fraser D.C.** Mapping of the resistivity, susceptibility, and permittivity of the earth using a helicopter-borne electromagnetic system // *Geophysics*. – 2001. – Vol. 66 (1). – P. 148–157, doi: 10.1190/1.1444889.
- Huang H., Fraser D.C.** The use of quad-quad resistivity in helicopter electromagnetic mapping // *Geophysics*. – 2002. – Vol. 67 (2). – P. 459–467, doi: 10.1190/1.1468605.
- Huang H., Fraser D.C.** Inversion of helicopter electromagnetic data to a magnetic conductive layered earth // *Geophysics*. – 2003. – Vol. 68 (4). – P. 1211–1223, doi: 10.1190/1.1598113.
- Huang H., Won I.J.** Real-time resistivity sounding using a handheld broadband electromagnetic sensor // *Geophysics*. – 2003. – Vol. 68 (4). – P. 1224–1231, doi: 10.1190/1.1598114.
- Huang H., Deszcz-Pan M., Smith B.** Limitations of small EM sensors in resistive terrain // *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems Proceedings*. – 2008. – P. 163–180, doi: 10.4133/1.2963255.
- Kaufman A.A., Keller G.V.** *Methods in geochemistry and geophysics. Frequency and transient soundings*. – Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, Elsevier, 1983. – 685 p.
- Keller G.V., Frischknecht F.C.** *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. – Oxford, Pergamon Press, 1966.
- Manstein Yu., Manstein A., Morelli G., Abu Zeid N., Santarato G.** Electromagnetic multifrequency sounding device EMS, prototype 2. Comparison with commercial tools // *Geophysical Research Abstracts Journal*, European Geophysical Society. – 2003. – Vol. 5. – P. 00208.
- McNeill J.D.** Electrical conductivity of soil and rocks // *Tech. Note TN-5*. Geonics Ltd., Mississauga. – Ontario, Geonics Limited. – 1980a. – 22 p.
- McNeill J.D.** Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers // *Tech. Note TN-6*. Geonics Ltd., Mississauga. – Ontario, Geonics Limited. – 1980b. – P. 015–021.
- McNeill J.D.** Use of EM31 inphase information // *Tech. Note TN-11*. Geonics Ltd., Mississauga. – Ontario, 1983. – 3 p.
- McNeill J.D.** Why doesn't Geonics Limited build a multi-frequency EM31 or EM38? // *Tech. Note TN-30*. Geonics Ltd., Mississauga. – Ontario, 1996. – 6 p.
- Ortuani B., Chiaradia E.A., Priori S., L'abate G., Canone D., Mele M., Comunian A., Giaudici M., Facchi A.** Comparing EM38 and Profiler-EMP400 for the delineation of homogeneous management zones within agricultural fields // *Proc. First Conference on Proximal Sensing Supporting precision agriculture (September 6–10, 2015)*. – Turin, 2015. – P. 1–5, doi: 10.3997/2214-4609.201413828.
- Santos F.A.M., Triantafyllis J., Taylor R.S., Holladay S., Bruzgulis K.E.** Inversion of conductivity profiles from EM using full solution and a 1-D laterally constrained algorithm // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – Vol. 15 (3). – P. 163–174, doi: 10.2113/JEEG15.3.163. S.
- Taylor R.S., Holladay J.S.** Detailed Low-Induction-Number EM Sounding to 9-m Depth // *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. – 2011. – P. 218–224, doi: 10.4133/1.3614303.

- Taylor R.S.** Mapping sites of environmental contamination with a dual-geometry electromagnetic (EM) system // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2000. – P. 1374–1376, doi: 10.1190/1.1815655.
- Triantafyllis J., Santos A.M.** Digital soil mapping with depth using EM38 and EM31 signal data and a 1-D laterally constrained inversion model // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems Proceedings. – 2011. – P. 225, doi: 10.4133/1.3614304.
- Wisén R., Auken E., Dahlin T.** Combination of 1D laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes // Near Surface Geophysics. – 2005. – Vol. 3 (2). – P. 71–79, doi: 10.3997/1873-0604.2005002.
- Won I.J., Keiswetter D.A., Fields G.R., Sutton L.C.** GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 1996. – Vol. 2 (1). – P. 129–138, doi: 10.4133/JEEG1.2.129.
- Won I.J., Keiswetter D.A., Hanson D.R., Novikova E., Hall T.M.** GEM-3: A monostatic broadband electromagnetic induction sensor // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 1997. – Vol. 2. – P. 53–64, doi: 10.4133/JEEG2.1.53.

REFERENCES

- Andrade F.C.M., Fischer T.** Generalised relative and cumulative response functions for electromagnetic induction conductivity meters operating at low induction numbers // Geophysical Prospecting. – 2018. – Vol. 66 (3). – P. 595–602, doi: 10.1111/1365-2478.12553.
- Auken E., Christiansen A.V., Jacobsen B.H., Foged N., Sørensen K.I.** Piecewise 1D laterally constrained inversion of resistivity data // Geophysical Prospecting. – 2005. – Vol. 53 (4). – P. 497–506, doi: 10.1111/j.1365-2478.2005.00486.x.
- Baidikov S.V., Chelovechkov A.I.** Equipment for induction sounding MChZ-8 // Ural Geophysical Bulletin. – 2011. – Vol. 1 (18). – P. 4–8.
- Baidikov S.V., Ivanov N.S., Ratushnyak A.N., Utkin V.I., Chelovechkov A.I.** Geoelectrical prospecting method: US Pat. 2250479 Russian Federation, IPC G01V 3/08; Applicant and patentee of IGF UB RAS; declared 25.10.2002, publ. 20.04.2005. – 2005. – Bul. No. 11. – 11 p.
- Balkov E.V.** Shallow frequency sounding in real time: hardware and software [Electronic resource] // Proceeding of IV All-Russian School-Seminar on Electromagnetic Sounding of the Earth (Moscow, September 1–4, 2009). – Moscow, 2009. – 2 p.
- Balkov E.V.** Multiple images in the signal from local objects during electromagnetic profiling with a compact probe with spaced-apart coils [Electronic resource] // Proceeding of All-Russian School-Seminar named after M.N. Berdichevsky and L.L. Vanyan on electromagnetic sounding of the Earth (St. Petersburg, May 16–21, 2011). – St. Petersburg, 2011. – 4 p.
- Balkov E.V., Adaykin A.A.** Control of equipment of frequency electromagnetic sounding using a pocket computer // Geoinformatics. – 2008. – No. 4. – P. 33–38.
- Balkov E.V., Stoikin T.A.** Shallow frequency sounding in the search for local conducting targets // Proceeding of VII International Exhibition and Scientific Congress "GEO-Siberia-2011" (Novosibirsk, April 19–29, 2011. – Novosibirsk, 2011. – Vol. 2 (1). – P. 179–185.
- Balkov E.V., Manstein Yu., Panin G.L., Beloborodov V.A.** Certificate of state registration of the EMS Control computer program; Testimony about register. prog. No. 2015616582; RU; No. 2014663924, app. 12/29/2014, publ. 15.06.2015.

- Callegary J.B., Ferré T.P.A., Groom R.W.** Vertical spatial sensitivity and exploration depth of low-induction-number electromagnetic-induction Instruments // *Vadose Zone Journal*. – 2007. – Vol. 6 (1). – P. 158–167, doi: 10.2136/vzj2006.0120.
- Chelovechkov A.I., Chistoserdov B.M.** Method of induction vertical sounding: US Pat. 2156987 Russian Federation, IPC G01V 3/08; Applicant and patentee of IGF UB RAS; declared 13.10.1998, publ. September 27, 2000.
- Chelovechkov A.I., Konoplin A.D., Ivanov N.S., Astafiev P.F., Vishnev V.S., Djakonova A.G.** Measuring device for geoelectrical exploration: US Pat. 2207596 Russian Federation, IPC G01V 3/08; Applicant and patentee of IGF UB RAS; declared 20.07.2001, publ. June 27, 2003.
- Chistoserdov B.M., Chelovechkov A.I., Baidikov S.V.** Method of induction vertical sounding: US Pat. 2230341 Russian Federation, IPC G01V 3/08; Applicant and patentee of IGF UB RAS; declared 10.12.2002, publ. June 10, 2004. – 2004a.
- Chistoserdov B.M., Chelovechkov A.I., Baidikov S.V.** Induction vertical method sounding // *Ural Geophysical Bulletin*. – 2004b. – Vol. 1 (6). – P. 112–114.
- Chelovechkov A.I., Baidikov S.V., Ratushnyak B.M., Chistoserdov B.M.** Geoelectrical prospecting method: US Pat. 2302018 Russian Federation, IPC G01V 3/08; Applicant and patentee of IGF UB RAS; declared June 21, 2005, publ. 27.06.2007. – 2007. – Bul. No. 18. – 15 p.
- Chelovechkov A.I., Ratushnyak B.M., Baidikov S.V., Astafiev P.F.** Geoelectrical prospecting method: US Pat. 2410730 Russian Federation, IPC G01V 3/16; Applicant and patentee of IGF UB RAS; declared September 16, 2008, publ. 27.01.2011. – 2011. – Bul. No. 3. – 11 p.
- Chelovechkov A.I., Baidikov S.V., Davydov V.A., Zhuravleva R.B.** Geoelectrical prospecting method: US Pat. 2460097 Russian Federation, IPC G01V 3/08; Applicant and patentee of IGF UB RAS; declared 05/12/2010, publ. 27.08.2012. – 2012. – Bul. No. 24. – 8 p.
- Christiansen A.V., Auken E., Foged N., Sørensen K.I.** Mutually and laterally constrained inversion of CVES and TEM data: a case study // *Near Surface Geophysics*. – 2007. – Vol. 5 (2). – P. 115–123, doi: 10.3997/1873-0604.2006023.
- Epov M.I., Yeltsov I.N., Antonov A.A., Vlasov E.V., Balkov E.V., Fage A.N.** Certificate of state registration of the computer program EMS v.2.0; St. about the register. prog. No. 2018614716; RU; No. 2018610657, app. 25.01.2018, publ. 04.17.2018.
- Huang H.** Depth of investigation for small broadband electromagnetic sensors // *Geophysics*. – 2005. – Vol. 70 (6). – P. G135–G142, doi: 10.1190/1.2122412.
- Huang H., Fraser D.C.** The differential parameter method for multifrequency airborne resistivity mapping // *Geophysics*. – 1996. – Vol. 61 (1). – P. 100–109, doi: 10.1190/1.1574674.
- Huang H., Fraser D.C.** Magnetic permeability and electrical resistivity mapping with a multifrequency airborne EM system // *Exploration Geophysics*. – 1998. – Vol. 29 (1–2). – P. 249–253, doi: 10.1071/EG998249.
- Huang H., Fraser D.C.** Airborne resistivity data leveling // *Geophysics*. – 1999. – Vol. 64 (2). – P. 378–385, doi: 10.1190/1.1444542.
- Huang H., Fraser D.C.** Airborne resistivity and susceptibility mapping in magnetically polarizable areas // *Geophysics*. – 2000. – Vol. 65 (2). – P. 502–511, doi: 10.1190/1.1444744.
- Huang H., Fraser D.C.** Mapping of the resistivity, susceptibility, and permittivity of the earth using a helicopter-borne electromagnetic system // *Geophysics*. – 2001. – Vol. 66 (1). – P. 148–157, doi: 10.1190/1.1444889.

- Huang H., Fraser D.C.** The use of quad-quad resistivity in helicopter electromagnetic mapping // *Geophysics*. – 2002. – Vol. 67 (2). – P. 459–467, doi: 10.1190/1.1468605.
- Huang H., Fraser D.C.** Inversion of helicopter electromagnetic data to a magnetic conductive layered earth // *Geophysics*. – 2003. – Vol. 68 (4). – P. 1211–1223, doi: 10.1190/1.1598113.
- Huang H., Won I.J.** Real-time resistivity sounding using a handheld broadband electromagnetic sensor // *Geophysics*. – 2003. – Vol. 68 (4). – P. 1224–1231, doi: 10.1190/1.1598114.
- Huang H., Deszcz-Pan M., Smith B.** Limitations of small EM sensors in resistive terrain // *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems Proceedings*. – 2008. – P. 163–180, doi: 10.4133/1.2963255.
- Ivanov N.S., Chelovechkov A.I.** Geoelectrical prospecting method: US Pat. 2172499 Russian Federation, IPC G01V 3/08; Applicant and patentee of IGF UB RAS; declared 06/13/2000, publ. 20.08.2001.
- Kaufman A.A., Keller G.V.** *Methods in geochemistry and geophysics. Frequency and transient soundings*. – Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, Elsevier, 1983. – 685 p.
- Keller G.V., Frischknecht F.C.** *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. – Oxford, Pergamon Press, 1966.
- Manstein A.K., Epov M.I., Voevoda V.V., Sukhorukova K.V.** Method of induction frequency sensing: US Pat. 2152058 Russian Federation, IPC G01V 3/10; Applicant and patentee of INGG SB RAS; declared 24.06.1998, publ. 2000. – 2000. – Bul. No. 18. – 4 p.
- Manstein Yu., Manstein A., Morelli G., Abu Zeid N., Santarato G.** Electromagnetic multifrequency sounding device EMS, prototype 2. Comparison with commercial tools // *Geophysical Research Abstracts Journal, European Geophysical Society*. – 2003. – Vol. 5. – P. 00208.
- Manstein A.K., Panin G.L., Tikunov S.Yu.** A device for shallow frequency-domain electromagnetic induction sounding // *Russian Geology and Geophysics*. – 2008. – Vol. 49 (6). – P. 430–436, doi: 10.1016/j.rgg.2007.10.013.
- Manstein A.K., Epov M.I., Balkov E.V., Sukhorukova K.V.** Method for calibrating a device for ground electromagnetic induction frequency sensing: US Pat. 2461850 Russian Federation, IPC G01V 13/00 (2006.01); Applicant and patentee of INGG SB RAS, No. 2010126402/28; declared 06/28/2010; publ. 20.09.2012. – 2012. – Bul. No. 26. – 5 p.
- McNeill J.D.** Electrical conductivity of soil and rocks // *Tech. Note TN-5*. Geonics Ltd., Mississauga. – Ontario, Geonics Limited. – 1980a. – 22 p.
- McNeill J.D.** Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers // *Tech. Note TN-6*. Geonics Ltd., Mississauga. – Ontario, Geonics Limited. – 1980b. – P. 015–021.
- McNeill J.D.** Use of EM31 inphase information // *Tech. Note TN-11*. Geonics Ltd., Mississauga. – Ontario, 1983. – 3 p.
- McNeill J.D.** Why doesn't Geonics Limited build a multi-frequency EM31 or EM38? // *Tech. Note TN-30*. Geonics Ltd., Mississauga. – Ontario, 1996. – 6 p.
- Ortuani B., Chiaradia E.A., Priori S., L'abate G., Canone D., Mele M., Comunian A., Giaudici M., Facchi A.** Comparing EM38 and Profler-EMP400 for the delineation of homogeneous management zones within agricultural fields // *Proc. First Conference on Proximal Sensing Supporting precision agriculture (September 6–10, 2015)*. – Turin, 2015. – P. 1–5, doi: 10.3997/2214-4609.201413828.
- Santos F.A.M., Triantafilis J., Taylor R.S., Holladay S., Bruzgulis K.E.** Inversion of conductivity profiles from EM using full solution and a 1-D laterally constrained algorithm // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – Vol. 15 (3). – P. 163–174, doi: 10.2113/JEEG15.3.163. S.

- Sekachev M.Yu., Balashov B.P., Sachenko G.V., Vechkanov O.P., Zakharkin A.K., Tarlo N.N., Mogilatov V.S., Zlobinsky A.V.** Instrumental electrical prospecting complex "Cycle-7" // Instruments and Systems of Exploration Geophysics. – 2006. – No. 1. – P. 44–46.
- Taylor R.S., Holladay J.S.** Detailed Low-Induction-Number EM Sounding to 9-m Depth // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. – 2011. – P. 218–224, doi: 10.4133/1.3614303.
- Taylor R.S.** Mapping sites of environmental contamination with a dual-geometry electromagnetic (EM) system // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2000. – P. 1374–1376, doi: 10.1190/1.1815655.
- Triantafilis J., Santos A.M.** Digital soil mapping with depth using EM38 and EM31 signal data and a 1-D laterally constrained inversion model // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems Proceedings. – 2011. – P. 225, doi: 10.4133/1.3614304.
- Trigubovich G.M., Persova M.G., Balyberdin A.L.** Telemetric electrical exploration equipment of the "Impulse" series for 3D electrical prospecting on dense space-time observation networks // Instruments and systems of exploration geophysics. – 2006. – Vol. 2 (16). – P. 22–25.
- Trigubovich G.M., Persova M.G., Soloveichik G.M.** 3D-electrical prospecting by the formation of the field [in Russian]. – Novosibirsk: Nauka, 2009. – 222 p.
- Wisén R., Auken E., Dahlin T.** Combination of 1D laterally constrained inversion and 2D smooth inversion of resistivity data with a priori data from boreholes // Near Surface Geophysics. – 2005. – Vol. 3 (2). – P. 71–79, doi: 10.3997/1873-0604.2005002.
- Won I.J., Keiswetter D.A., Fields G.R., Sutton L.C.** GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 1996. – Vol. 2 (1). – P. 129–138, doi: 10.4133/JEEG1.2.129.
- Won I.J., Keiswetter D.A., Hanson D.R., Novikova E., Hall T.M.** GEM-3: A monostatic broadband electromagnetic induction sensor // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 1997. – Vol. 2. – P. 53–64, doi: 10.4133/JEEG2.1.53.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

БАЛКОВ Евгений Вячеславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: разработка программных и аппаратных средств для малоглубинных электроразведочных методов, комплексные инженерно- и археолого-геофизические изыскания.

ФАДЕЕВ Денис Игоревич – научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: разработка малоглубинной электроразведочной аппаратуры, комплексные инженерно- и археолого-геофизические изыскания.

*Статья поступила в редакцию 12 июля 2021 г.,
принята к публикации 24 августа 2021 г.*