

РАЗРАБОТКА И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПАКТНОЙ МАЛОГЛУБИННОЙ АППАРАТУРЫ ИНДУКЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Денис Игоревич Фадеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, научный сотрудник, e-mail: FadeevDI@ipgg.sbras.ru

В статье описаны экспериментальные работы по выявлению характеристик и закономерностей зависимости уровня сигнала от параметров разрабатываемой новой компактной аппаратуры индукционных электромагнитных исследований. Показана применимость разработанного аппаратно программного комплекса для решения не типичных задач электроразведки.

Ключевые слова: аппаратура электромагнитных исследований, компактные индукционные приборы, малоглубинная геофизика

DEVELOPMENT AND EXPERIENCE OF APPLICATION OF COMPACT NEAR SURFACE EQUIPMENT FOR INDUCTION ELECTROMAGNETIC RESEARCH

Denis I. Fadeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Researcher, e-mail: FadeevDI@ipgg.sbras.ru

The article describes experimental work to identify the characteristics and patterns of the dependence of the signal level on the parameters of the new compact near surface equipment being developed for induction electromagnetic research. The applicability of the developed hardware-software complex for solving non-typical problems of electrical prospecting is shown.

Key words: equipment for electromagnetic research, compact induction instruments, near surface geophysics

Актуальность работы обусловлена необходимостью развития геофизических методов изучения первых метров геологической среды. Эта область верхней части разреза наиболее подвержена антропогенному и техногенному воздействию, и потому, зачастую неоднородна, при этом являясь объектом научных и инженерных изысканий по всему миру. Несмотря на близость области изучения наиболее употребительными остаются прямые методы исследований (вскрытие, экскавация), как самые простые и не требующие специальных технологий. Решением задачи бесконтактного изучения первых метров разреза может являться индукционная электроразведка. Принципы малоглубинных индукционных исследований нашли отражение в целом ряде приборов (например, линейки приборов Geonics Limited: EM-31, 34, 38; Geophex Ltd: GEM-2, 3, 5 и другие). Среди компактных устройств для индукционных исследований известна российская аппаратура ЭМС, разработанная в ИНГГ СО РАН [Манштейн и др., 2000; Манштейн и др., 2008], среди зарубежных - GEM-2, DUALEM, CMD-Explorer [Won et al., 1996; Taylor, 2000]. Но, несмотря на достаточно длительное развитие

данной геофизической отрасли, выпускаемая компактная аппаратура имеет недостатки, а сама эффективность применения малоглубинных индукционных зондирований является предметом споров [Gebbers and Lück, 2005; Clay, 2006]. 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. Схемы с компенсацией первичного поля работают лучше, но их настройка и калибровка требуют применения сложных электротехнических схем и конструктивных решений. Остро встал вопрос о нахождении альтернативного метода компенсации поля генератора. В результате исследований было обнаружено наличие поверхности, на которой вертикальная компонента магнитного поля меняет знак, проходит через ноль. Данный результат дал предпосылки к созданию прибора, у которого регистрирующая катушка расположена в зоне минимального прямого поля.

Для определения оптимальной конструкции разрабатываемой аппаратуры необходимо определить зависимости между ее характеристиками и измеряемым сигналом, а также наложить ограничения. Измеряемая в аппаратуре э.д.с. зависит от вертикальной компоненты напряженности магнитного поля H_z , эта компонента напряженности магнитного поля, источником которого является вертикальный магнитный диполь, расположенный на поверхности немагнитной (магнитная проницаемость принята всюду постоянной и равной значению в вакууме) горизонтально-слоистой среды, и измеряемая приемным диполем выглядит следующим образом:

$$1. H_z = \frac{M_t M_R}{2\pi} \int_0^\infty \lambda^3 J_0(\lambda r) X_N d\lambda \quad (1)$$

где N – количество слоёв, X_N – слоистая функция, которая вычисляется рекурсивным алгоритмом, приведенным в следующих источниках [Могилатов, 1993]. Как мы видим из уравнения (1) напряженность поля прямо пропорциональна моменту генераторного (M_t) и приемного магнитного диполя (M_R). Таким образом возможно добиться улучшения качества собираемой о геоэлектрическом разрезе информации увеличив момент передающей и регистрирующей катушек.

Полный момент источника вычисляется следующим образом:

$$2. M_t(f) = I \cdot S \cdot n \quad (2)$$

где $S = \pi R^2$ – площадь генераторной петли, R – радиус генераторной петли, n – число витков генераторной петли, I – сила тока в генераторе. Так как частота свободных колебаний является частотой резонанса контура, реактивное сопротивление индуктивности равно реактивному сопротивлению ёмкости:

$$3. R_L = 2\pi fL = R_C = 1/(2\pi fC) \quad (3)$$

Таким образом емкость подбирается такой чтобы соблюдалось условие резонанса, ее значение определяется индуктивностью контура.

Для расчета индуктивности многослойной катушки воспользуемся эмпирической формулой [Wheller, 1982]:

$$4. L = 0.02 \frac{R^2 n^2}{6R + 9l + 10c} \quad (4)$$

где R – средний радиус намотки, l – длина намотки, c – толщина намотки. Получаем что индуктивность пропорциональна квадрату числа витков $L \propto n^2$.

Для решения задачи повышения эффективности результатов малоглубинных индукционных исследований необходимо добиться наибольших значений момента генераторной и приемной катушек. При этом диаметр генераторной петли должен быть выбран таким, чтобы была возможность рассмотрения источника в виде магнитного диполя, расположенного на границе воздух-земля. Дополнительное ограничение на параметры петли накладывает условие резонанса (3)(3), так как необходимо подобрать конденсатор номиналом меньше 4 мкФ в связи с ограничениями по габаритам схемы и их температурной стабильности. Важно отметить необходимость применения конденсаторов способных проводить ток. В нашем случае это К73-17 – металлизированные пленочные конденсаторы группы диэлектрика полиэтилентерефталат (конденсатор, изготавливается из двух лент фольги, оксидированной и неоксидированной, между которыми размещается прокладка из бумаги пропитанная электролитом). Таким образом индуктивность должна быть больше $5.5 \cdot 10^{-5}$ Гн. Задача сводится к максимизации момента при варьировании параметров: R – радиус генераторной петли, n – число витков. При этом остаются постоянными параметры намотки катушки индуктивности и режима измерений.

Рисунок 1 демонстрирует результаты расчетов момента и тока в генераторной катушке для частоты 12.3 кГц, в зависимости от количества витков и их радиуса. Мы можем наблюдать некоторые зависимости, а именно: рост момента с увеличением радиуса катушки и уменьшение момента при наращивании числа витков, что связано с ростом индуктивности катушки (пропорционально квадрату числа витков) и как следствие падением уровня тока. Ток в генераторной катушке также обратно пропорционален радиусу витка (4). Следуя приведенным закономерностям, учитывая ограничения, накладываемые дипольным приближением и условием резонанса, с учетом опытных работ по изучению реальных объектов при помощи прототипа (Балков и др., 2014) возможно определить оптимальные параметры для аппаратуры.

Для любой аппаратуры важным параметром является время его работы без подзарядки. В случае многократного повторения измерений основной вклад в энергопотребление вносит генератор. Создание сигнала с необходимой частотой происходит в две фазы: первая генерирует короткий импульс шириной $\tau = \frac{T}{8}$, и расстоянием между импульсами – T . На втором этапе генерируется импульс с такой же амплитудой, но противоположный по знаку. Его характеристики аналогичны предыдущему. Тем самым получаем, что время работы генератора за

период времени равно $\frac{3T}{8}$. Кроме непосредственно генератора, необходимо учесть потребление управляющего модуля. Он затрачивает энергию сразу после включения прибора, в постоянном режиме. В таком режиме прибору необходим ток 0.32 А. Время работы АЦП составляет примерно $80 \cdot 10^{-3}$ с. Общее время цикла работы порядка 0.1 с.

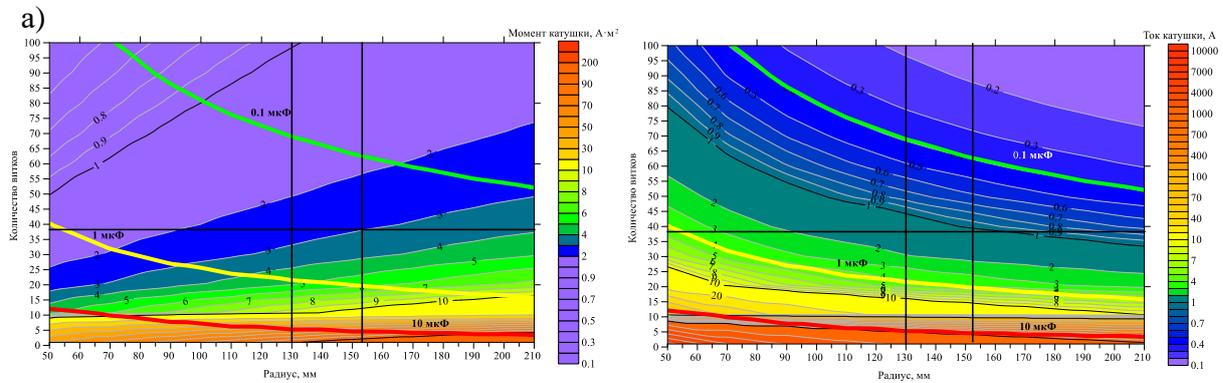


Рис. 1 Распределение момента катушки (а) и тока в генераторе (б) в зависимости от числа витков и их радиуса

Были проведены эксперименты по измерению тока потребления непосредственно при работе прибора. Измерения проводились на широком ряде частот с тремя повторениями и дальнейшим осреднением (Таблица 1). Измеренные данные достаточно приемлемо укладываются в тренд степенной функции, и могут быть интерполированы на больший диапазон частот (Рисунок 2). Используемая в аппаратуре батарея способна обеспечивать такой режим потребления тока в течение 10 часов без изменения технических характеристик.

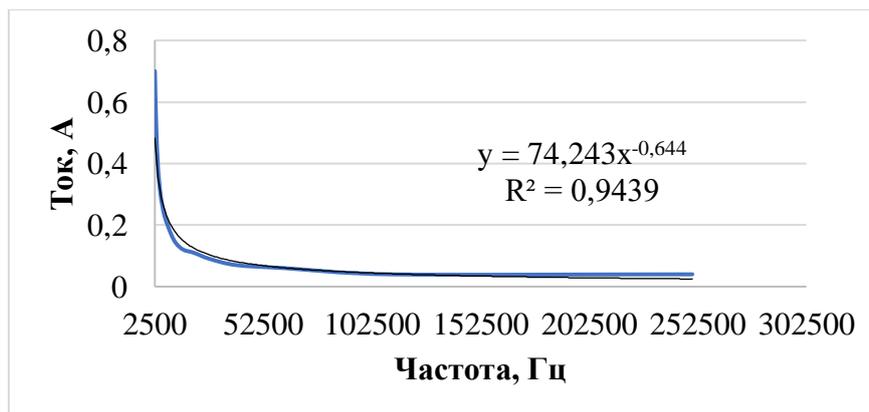


Рис. 21 График зависимости тока потребления, за вычетом постоянной добавки холостого хода, от частоты

Результаты эксперимента по нахождению тока потребления

#F	Ток потребления			В холостом режиме, А
	f, Гц	I, А	I-I _{холост}	
1	2501	1,02	0,7	0,32
2	3081	0,85	0,53	
3	3907	0,71	0,39	
4	5103	0,62	0,3	
5	6945	0,55	0,23	
6	10001	0,49	0,17	
7	12346	0,46	0,14	
8	15620	0,44	0,12	
9	20409	0,43	0,11	
10	27779	0,41	0,09	
11	40001	0,39	0,07	
12	62502	0,38	0,06	
13	111113	0,36	0,04	
14	250004	0,36	0,04	

Чувствительность аппаратуры к изменениям УЭС среды дает основания для применения при изучении сложно построенных сред, значительно отличающихся от горизонтально слоистой. Решающее значение в формировании аномалий в такой среде являются антропогенные и техногенные мишени. Малоглубинность и высокая разрешающая способность разрабатываемого аппаратурно-программного комплекса позволяют находить его применение в областях недоступных другим методам. Применение аппаратуры для решения не профильных задач - один из способов ее развития. Проведение опытных и пилотных работ помогает определить параметры, улучшение которых, необходимо для успешного решения конкретного типа задач.

Не многие геофизические методы могут применены в зданиях. Безоговорочным лидером тут являются георадары. Но разрабатываемая аппаратура может выступать альтернативным способом решения задачи определения структуры балочных перекрытий. Были проведены опытные экспериментальные исследования балочных перекрытий в рамках работы выставки Инженерная геофизика 2019 (г. Геленджик, Россия). Рисунок 3

Рис. демонстрирует пример профильной кривой, на которой виде локальных минимумов выделяются 7 балок. Увеличение уровня сигнала к центру зала связано с находящимися по этой прямой коммуникациями. Проведённая следом георадарная съемка подтвердила определенную аппаратурой структуру. Таким образом, несмотря на наличие постоянных и периодических помех в зданиях, применение аппаратуры с достаточной достоверностью помогает решать такой тип задач. Так как уровень полезного сигнала от балок порядка 2000 ед. эффективность использования аппаратуры может быть значительно увеличена за счет снижения ее чувствительности. Это позволит убрать значительную часть издержек при ее производстве и повысить рентабельность ее использования.

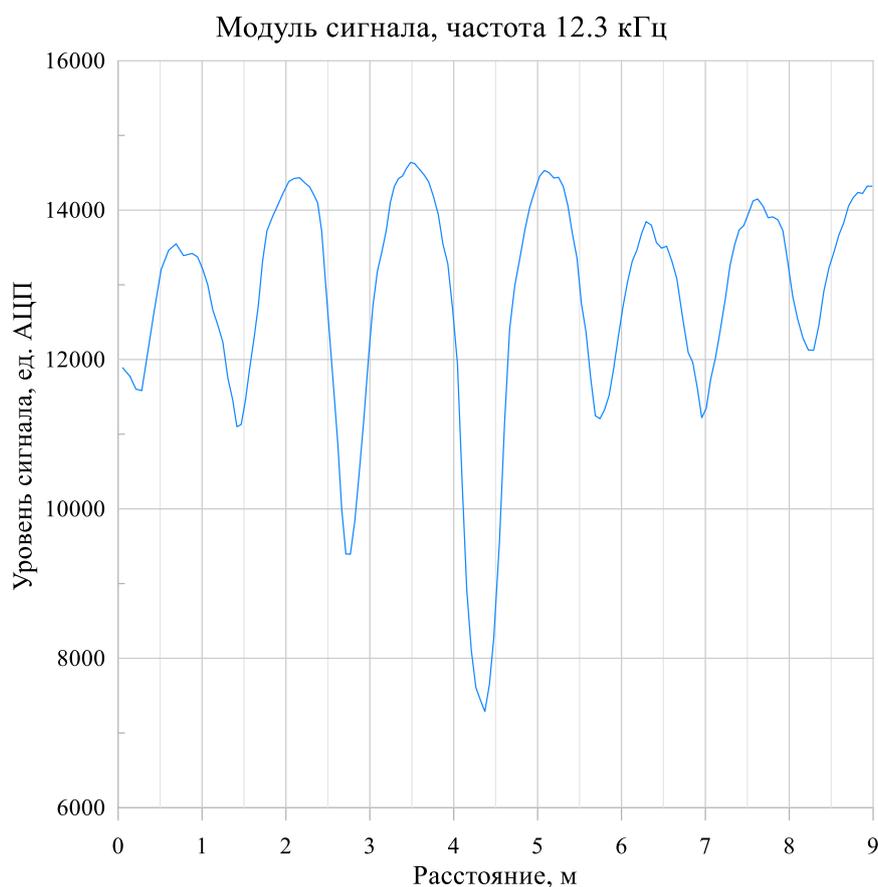


Рис. 3 Профильная кривая измерений, проведенных в стенах здания. В виде локальных минимумов ярко выражаются металлические балки в полу

Рассматривать задачу локализации пустот можно в рамках поиска ограниченного объема, заполненного воздухом, в более проводящей вмещающей среде. Разрешимость задачи в таком случае явно зависит не только от геометрических размеров и глубины до кровли, но и сопротивления вмещающей среды. В случае пород умеренной проводимости ($УЭС\ 50-150\ Ом\cdot м$) удастся решить задачу при глубине залегания кровли объекта до 2 м. Рисунок 4 отображает результаты проведенных изысканий по поиску погребенного бункера. В структуре сооружения нет армированных элементов, соответственно поисковым признаком будет повышенное сопротивление по сравнению со вмещающей средой. На картах распределения кажущего $УЭС$ можно выделить две области, начинающиеся проявляются с 1.5 метров глубины на интервале 2-4 метра по оси X и 1.5-2.5 метра по оси Y. На дневной поверхности асфальтовое покрытие до 14 метра по оси X. Эскавация обозначенного участка подтвердила наличие искомого объекта на 2-4 метрах. Аномалия, выделяемая на 7 метре, не нашла отражения при вскрытии, возможно она связана с выемкой и последующим возвратом грунта при строительстве сооружения.

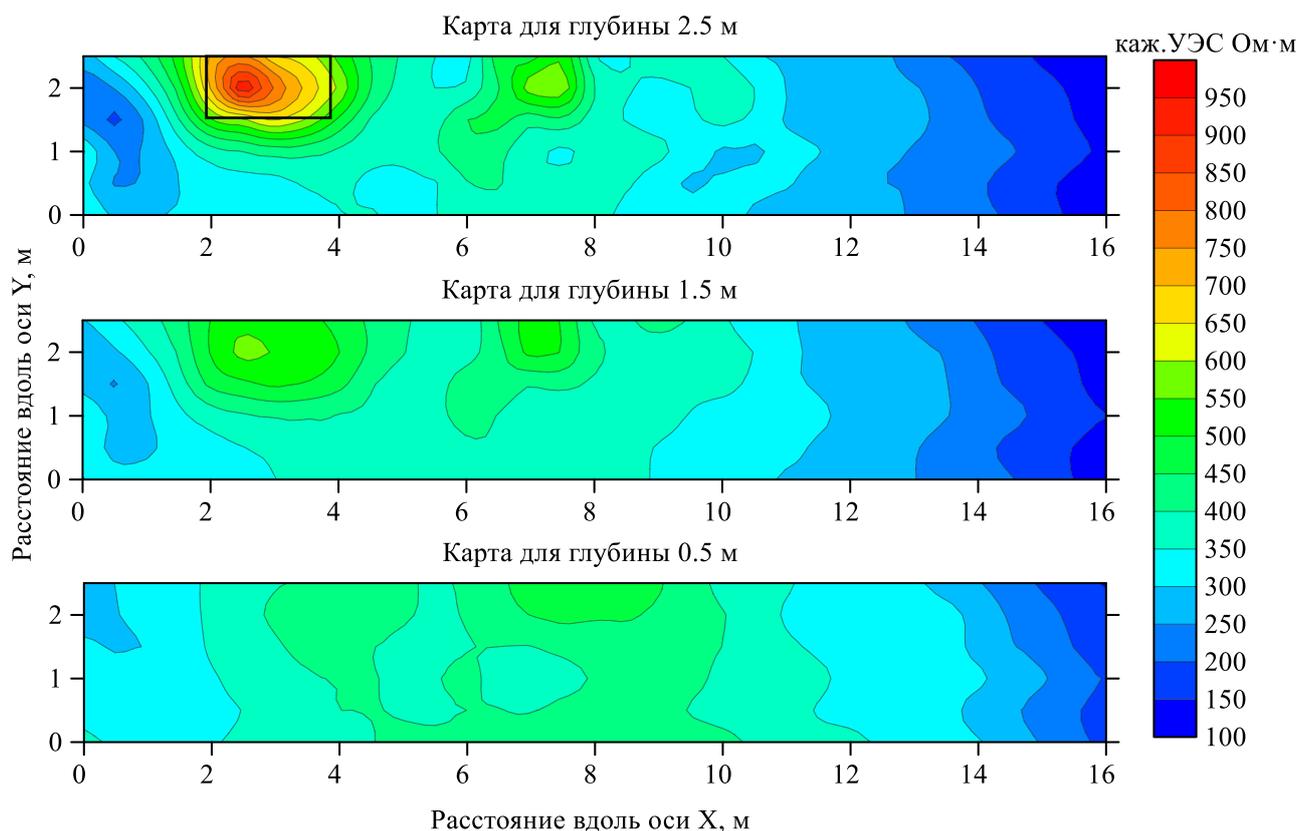


Рис. 4 Карты распределения кажущегося удельного электрического сопротивления для трех частот аппаратуры Геовизер. Задача локализации полости. Подтверждено ее наличие на 2-4 метрах по оси X

В результате проведенных исследований установлены некоторые технические характеристики аппаратуры и зависимости, позволяющие подобрать оптимальные параметры компактного индукционного прибора под конкретные ограничения и задачи. Опытные работы по изучению не типичных задач электроразведки показали возможность применения разработанного аппаратурно программного комплекса при их решении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балков Е.В., Халатов С.Ю., Манштейн А.К., Панин Г.Л. Малоглубинное электромагнитное профилирование компактной аппаратурой: теоретические оценки и результаты экспериментальных работ [Электронный ресурс] // Инженерная геофизика 2014: 10-я юбилейная конференция и выставка (г. Геленджик, 21-25 апреля 2014 г.). – 2014.
2. Манштейн А.К., Панин Г.Л., Тикунов С.Ю. Аппаратура частотного электромагнитного зондирования “ЭМС” // Геология и геофизика. – 2008. – № 6. – С. 571–579.
3. 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. 2000, Бюл. № 18.
4. Могилатов В.С. Об одном способе решения основной прямой задачи электроразведки ЗС // Геология и геофизика. – 1993. – Т. 34. – № 3. – С. 108-117.

5. Clay R.B. Conductivity (EM) survey: A survival manual // Remote Sensing in Archaeology—An Explicitly North American Perspective; Johnson, K., Ed.; University of Alabama: Tuscaloosa, AL, USA, 2006, P. 79–107.

6. Gebbers R. and Lück E. Comparison of geoelectrical methods for soil mapping // 5th European Conference on Precision Agriculture (5ECPA) and Precision Livestock Farming (2ECPLF), Uppsala, Sweden, 9–12 June 2005.

7. Taylor R.S. Mapping sites of environmental contamination with a dual-geometry electromagnetic (EM) system. Proceeding of the Society of Exploration Geophysicists Annual Meeting, Expanded Abstracts. –2000. – E12.

8. Wheller H.A. Inductance formulas for circular and square coils // Proc. IEEE. – 1982. – Vol. 70. – № 12. – P. 1449-1450.

9. Won I.J., Keiswetter D.A., Fields G.R.A., Sutton L.C. GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 1996. – V. 2(1). – P. 129-138.

REFERENCES

1. Balkov E.V., Halatov S.YU., Manshtejn A.K., Panin G.L. Maloglubinnoe elektromagnitnoe profilirovanie kompaktnoj apparaturoj: teoreticheskie ocenki i rezul'taty eksperimental'nyh rabot [Elektronnyj resurs] // Inzhenernaya geofizika 2014: 10-ya yubilejnaya konferenciya i vystavka (g. Gelendzhik, 21-25 aprelya 2014 g.). – 2014.

2. Manshtejn A.K., Panin G.L., Tikunov S.YU. Apparatura chastotnogo elektromagnitnogo zondirovaniya “EMS” // Geologiya i geofizika. – 2008. – № 6. – С. 571–579.

3. Manshtejn A.K., Epov M.I., Voevoda V.V., Suhorukova K.V. Sposob indukcionnogo chastotnogo zondirovaniya: pat. 2152058 Rossijskaya federaciya, MPK G01V 3/10 / zayavitel' i patentoobladatel' INGG SO RAN; zayavl. 24.06.1998, opubl. 2000, Byul. № 18.

4. Mogilatov V.S. Ob odnom sposobe resheniya osnovnoj pryamoj zadachi elektrorazvedki ZS // Geologiya i geofizika. – 1993. – T. 34. – № 3. – S. 108-117.

5. Clay R.B. Conductivity (EM) survey: A survival manual // Remote Sensing in Archaeology—An Explicitly North American Perspective; Johnson, K., Ed.; University of Alabama: Tuscaloosa, AL, USA, 2006, P. 79–107.

6. Gebbers R. and Lück E. Comparison of geoelectrical methods for soil mapping // 5th European Conference on Precision Agriculture (5ECPA) and Precision Livestock Farming (2ECPLF), Uppsala, Sweden, 9–12 June 2005.

7. Taylor R.S. Mapping sites of environmental contamination with a dual-geometry electromagnetic (EM) system. Proceeding of the Society of Exploration Geophysicists Annual Meeting, Expanded Abstracts. –2000. – E12.

8. Wheller H.A. Inductance formulas for circular and square coils // Proc. IEEE. – 1982. – Vol. 70. – № 12. – P. 1449-1450.

9. Won I.J., Keiswetter D.A., Fields G.R.A., Sutton L.C. GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 1996. – V. 2(1). – P. 129-138.

© Д. И. Фадеев, 2021