

## КОРРЕКЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ДРЕЙФА В АППАРАТУРЕ ЧАСТОТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*Александр Константинович Маништейн*

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

*Евгений Сергеевич Хлыстун*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса 20 к4, студент, e-mail: zheka.hlistyn@gmail.com

Разработан способ коррекции температурного дрейфа данных во время работы геофизического прибора наземного индукционного частотного зондирования. Прибор рассматривается как измеритель кажущегося удельного электросопротивления проводящего полупространства. В процессе изготовления аппаратуры экспериментально измеряется температурный коэффициент сопротивления (ТКС) устройства для каждой частоты в отдельности. ТКС устройства применяется для приведения величин измеренного сопротивления к некоторой нормализованной температуре, например, 20 °С. Результаты выполненных испытаний обработаны и систематизированы с помощью Microsoft Excel. Построены графики зависимости сопротивления от температуры. Разработанный метод исправления температурного воздействия предназначен для повышения точности обработки данных, получаемых с помощью аппаратуры, функционирующей в условиях изменяющейся температуры окружающей среды.

**Ключевые слова:** коррекция температурного дрейфа, температурный коэффициент сопротивления, измерения удельного электрического сопротивления грунта, геофизическая аппаратура

## CORRECTION OF THE TEMPERATURE DRIFT IN THE GEOPHYSICAL INSTRUMENT OF GROUND-BASED INDUCTION FREQUENCY SOUNDING

*Alexander K. Manshtein*

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

*Yevgeniy S. Khlystun*

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, Karl Marx Prospect 20, k4, student, e-mail: zheka.hlistyn@gmail.com

A technique for correcting the temperature drift in the measurements of the geophysical instrument of ground-based induction frequency sounding has been developed. The device is considered as a measure of the apparent electrical resistivity of the conducting half-space. In the process of manufacturing the equipment, the temperature coefficient of resistance (TCR) of the device is experimentally measured for each frequency separately. The TCR of the device is used to bring the measured resistance values to a certain normalized temperature, for example, 20 °C. The results of the tests performed were processed and systematized using Microsoft Excel. The graphs of the dependence of resistance on temperature are built. The developed methods are intended to improve the accuracy of

data processing obtained with the help of equipment operating under conditions of changing ambient temperatures.

**Keywords:** correction of temperature drift, temperature coefficient of resistance, measurements of electrical resistivity of soil, geophysical equipment

### *Введение*

Аппаратурно-программные комплексы индукционного частотного электромагнитного зондирования являются перспективными инструментами для геофизических исследований вблизи поверхности. Они обеспечивают бесконтактные, неинвазивные и портативные измерительные функции. Применения варьируются от определения засоленности почв, разведки полезных ископаемых, анализа содержания глины и воды, до оценки органического вещества в почвоведении [1]. Такие приборы состоят из одного или нескольких приёмных блоков с различным, но фиксированным расстоянием до передающего блока, что позволяет комплексу воспринимать различные диапазоны глубин подповерхностного пространства примерно в 1,5 раза больше, чем расстояние между приёмником и передатчиком [2]. Измеряемые значения, кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС), дрейфуют из-за тепловых эффектов в приёмниках и передатчике, и тем самым препятствуют количественному анализу истинного распределения электропроводности подповерхностного слоя. Ошибочные отклонения связаны с изменяющейся во времени окружающей температуры [3, 4].

Прибор измеряет разность потенциалов в антенном устройстве (ЭДС), после чего ЭДС нормируется на значение тока в генераторе. Следовательно, размерность измеряемой величины равна  $[V/A]$  и сигнал пропорционален сопротивлению  $[Om]$ .

Исследованию влияния температуры на измеряемые данные в подобной аппаратуре посвящены работы, например: Robinson D.A. и соавт. [4], Xihe Tan [5], Abdu H и соавт. [6], Huang J и соавт. [7]. В работе Abdu H и соавт. говорится, что под влиянием условий испытаний с переменной температурой оба прибора DUALEM-1S и EM38-DD показывали более высокую погрешность (10-40 %) при низких электропроводностях грунта ( $\leq 0.02$  См/м), в то время как ошибка становилась менее значительной ( $\sim 5\%$ ) при более высокой электропроводимости ( $> 0.1$  См/м), при изменении температуры на  $20$  °C [6].

Экспериментальное изучение авторами данной статьи температурного дрейфа характеристик блоков и узлов аппаратуры не выявило наличия сильно зависимых от температуры характеристик отдельных элементов. Например, в приёмной катушке с ферритовым сердечником диаметром 50 мм и числом витков 50 в интервале температур от  $20$  °C до  $60$  °C зарегистрированы изменения собственной резонансной частоты на  $0.08$  %. Но записываемый измеряемый сигнал прибора зависит от температуры.

Целью работы является разработка и применение физико-математического обеспечения коррекции температурного дрейфа отклика аппаратуры индукционного частотного зондирования АЭМП-14 [1]. Метод коррекции основан на:

1. Определении по экспериментальным данным для каждого экземпляра аппаратуры температурного коэффициента электрического сопротивления (ТКС) для каждой частоты в отдельности;
2. Измерении текущих температур внутри корпуса прибора с погрешностью до  $\pm 0.5$  °С.
3. Выполнении во время работы термокомпенсации измеряемых данных приведением их к значениям при температуре + 20 °С;

Экспериментально установлено, что для разных уровней полезного сигнала данной частоты ТКС достаточно постоянен.

### *Температурная зависимость сигнала аппаратуры АЭМП-14*

Эксперименты выполнялись в зимних условиях. Прибор выносили из тёплого помещения на улицу, неподвижно устанавливали над грунтом с УЭС не менее 100 Ом·м на высоте 1,5 м и записывался отклик от верхнего подповерхностного слоя. Пример отклика для частоты №2 (3088 Гц) приведён на рис.1, где по оси абсцисс указана температура прибора через 1 °С, по оси ординат - кажущееся сопротивление грунта в условных единицах.

Анализ экспериментальных данных (см. рисунок 1) показывает, что аппроксимированный сигнал в антенне, нормированный на ток генератора, имеет линейную зависимость от температуры.

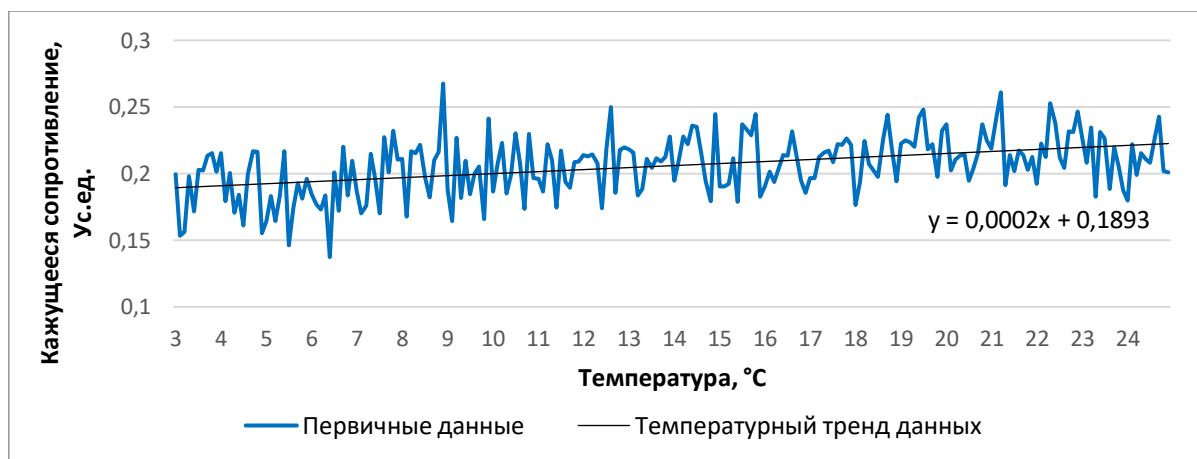


Рис. 1. Модуль комплексного сигнала  $\varepsilon / L$ , частота №2 и тренд.

Для компенсации температурного дрейфа применим тригонометрические свойства уравнения прямой с угловым коэффициентом [8, 9]

$$y = k \cdot x + b, \quad (1)$$

где  $b$  – расстояние от начала координат до пересечения оси ординат и прямой;  
 $k$  – угловой коэффициент прямой.

Распишем угловой коэффициент прямой:

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x} , \quad (2)$$

где:  $\Delta y = y_2 - y_1$ ;

$\Delta x = x_2 - x_1$  .

Теперь, используя записанное ранее, проведём аналогию с нашими данными.

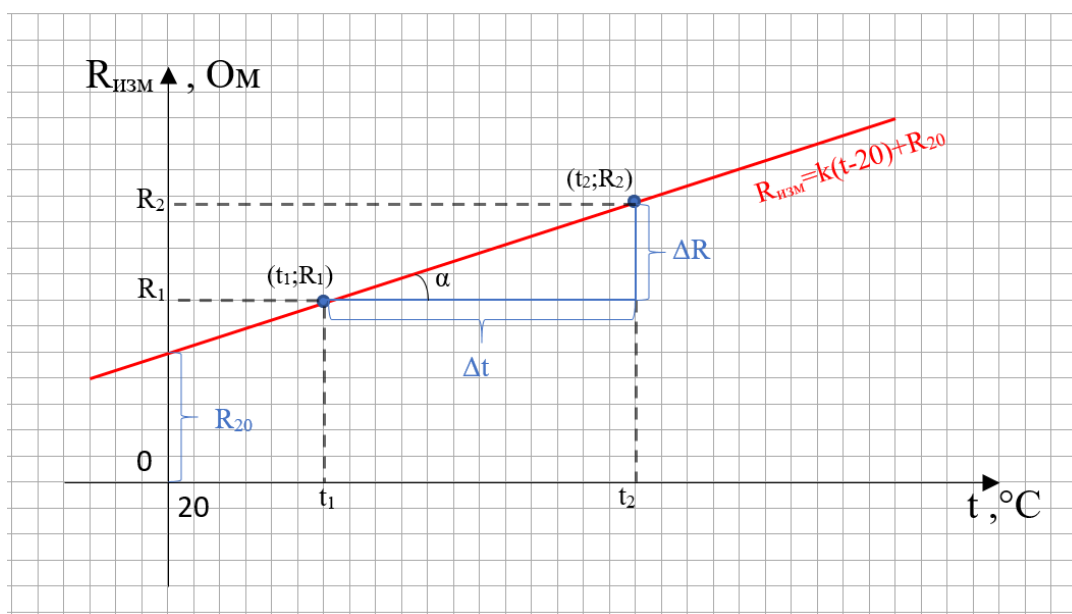


Рис. 2. Схематичное изображение тренда измеряемого сопротивления при изменении температуры окружающей среды

Целью компенсации температурного дрейфа является приведение измерений к какой-то одной температуре. Так как в АЭМП-14 много радиокомпонентов, которые вносят свой вклад в температурную зависимость сигнала, будем рассматривать компенсацию для всей аппаратуры. В таком случае нормальной температурой работы аппаратуры будем считать  $20^{\circ}\text{C}$ , так как при этой температуре все радиодетали в приборе работают в нормальном режиме.

Поскольку используется  $20^{\circ}\text{C}$ , а не  $0^{\circ}\text{C}$ , то это нужно учесть при составлении уравнения. Ось ординат будет пересекать абсциссу не в точке ноль, а в точке равной 20. Это показано на рис. 2.

Запишем уравнение температурной зависимости сигнала аппаратуры используя аналогию с уравнением (1) и учитывая поправки, описанные выше:

$$R_{\text{изм}} = k \cdot (t - 20) + R_{20} , \quad (3)$$

где:  $R_{изм}$  – измеренное сопротивление прибором;  
 $k$  – угловой коэффициент прямой;  
 $t$  – температура на момент измерения (в приборе);  
 $R_{20}$  – сигнал при нормальной температуре.

Для нахождения углового коэффициента, возьмём две произвольные точки на прямой. Опустив перпендикуляр на оси, определим координаты, которые будут соответствовать значениям  $(R_1, t_1)$  и  $(R_2, t_2)$ . После нахождения подставляем в уравнение (4).

Распишем угловой коэффициент прямой, ссылаясь на уравнение (2):

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta R}{\Delta t}, \quad (4)$$

где:  $\Delta R = R_2 - R_1$ ;

$\Delta t = t_2 - t_1$ .

Подставим (4) в (3):

$$R_{изм} = \frac{\Delta R}{\Delta t} \cdot (t - 20) + R_{20} \quad (5)$$

Умножим и разделим левую часть суммы на  $R_{20}$ , чтобы в дальнейшем избавиться от зависимости уровня сигнала:

$$R_{изм} = \frac{\Delta R}{\Delta t} \frac{R_{20}}{R_{20}} \cdot (t - 20) + R_{20}. \quad (6)$$

Выделим часть уравнения и введём новое обозначение:

$$\frac{\Delta R}{\Delta t} \frac{1}{R_{20}} = \alpha, \quad (7)$$

где:  $\alpha$  – известный в технике температурный коэффициент сопротивления (ТКС)  $\left[ \frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$ .

Произведём замену (7) в (6) и вынесем  $R_{20}$ :

$$R_{изм} = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (t - 20)]. \quad (8)$$

Из уравнения (8) видно, что измеряемый сигнал состоит из сигнала при нормальной температуре и компоненты, зависимой от температуры.

Таким образом, величина сигнала, приведённая к нормальной температуре равна:

$$R_{20} = R_{изм} / [1 + \alpha \cdot (t - 20)] \quad (9)$$

При данном решении, происходит поворот прямой относительно точки при 20 °С, за счёт чего выполняется компенсация температурного дрейфа.

Используя уравнение (9), выполним компенсацию для ранее представленного примера на рис. 1 и представим несколько других результатов применения данного способа температурной компенсации на рисунках 3 и 4.

Отметим, что для температурной компенсации предварительно необходимо экспериментально определить температурный коэффициент сопротивления ( $\alpha$ ) аппаратуры для каждой частоты в отдельности.

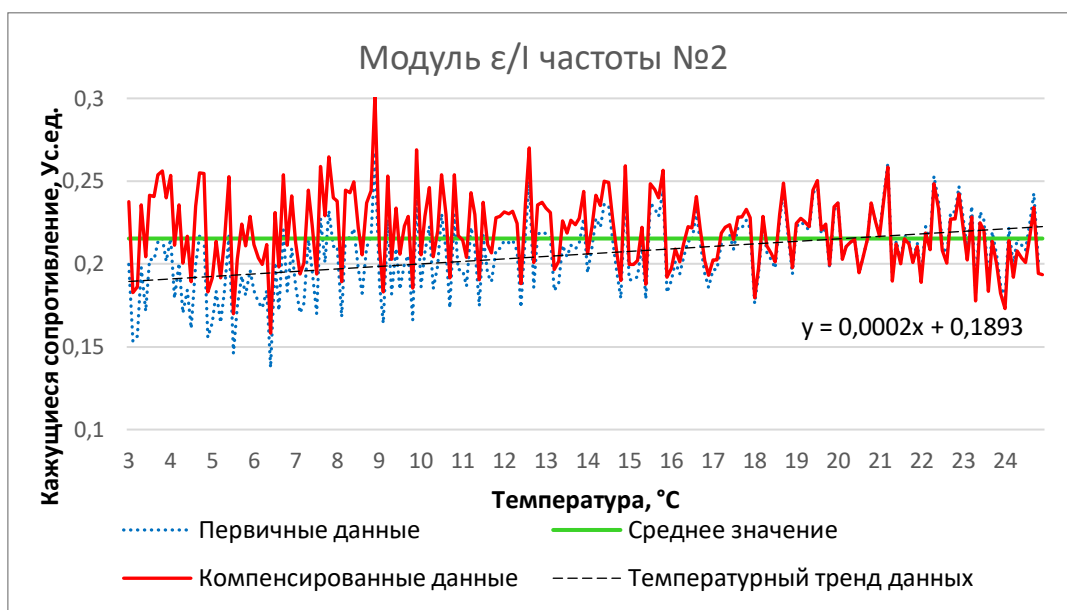


Рис. 3. Коррекция температурной зависимости измерений.  
Частота 3088 Гц, ТКС =  $9,4 \cdot 10^{-3}$  ( $1/^\circ\text{C}$ )

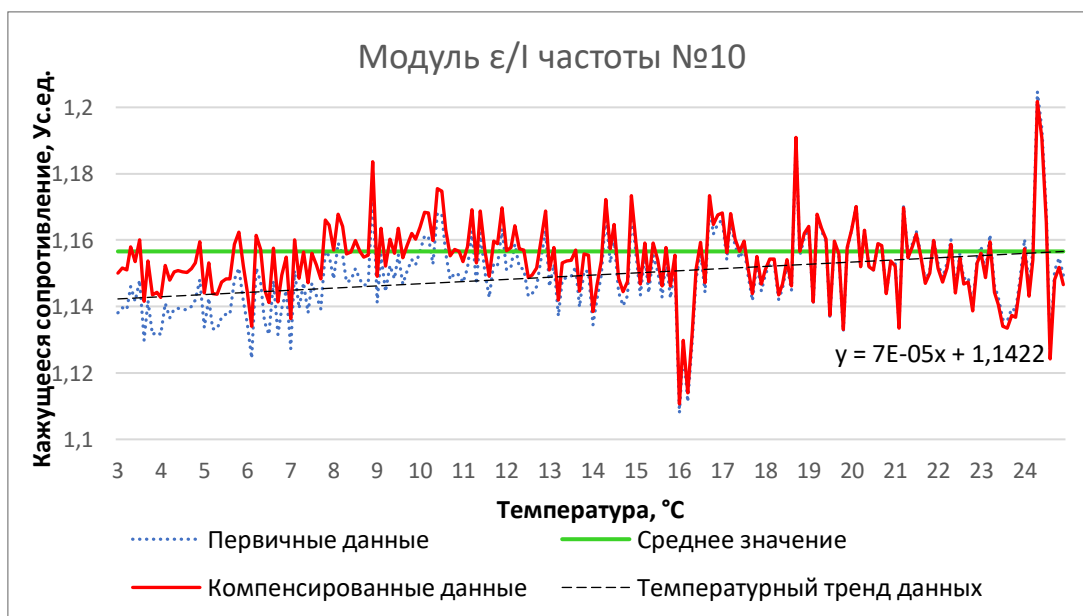


Рис. 4. Коррекция температурной зависимости измерений.  
Частота 27779 Гц, ТКС =  $0,61 \cdot 10^{-3}$  ( $1/^\circ\text{C}$ )

#### *Обозначение линий:*

синяя пунктирная – измеренный сигнал, нормированный на ток без температурной компенсации - первичные данные;

чёрная пунктирная – линия тренда, проведённая по средним значениям первичных данных;

красная – данные приведённые к 20 °С, полученные с помощью уравнения (9);

зелёная – линия среднего значения сигнала, при 20 °С.

#### ***Алгоритм коррекции температурного дрейфа в аппаратуре***

В аппаратурно-программном комплексе наземного индукционного частотного зондирования необходимо ввести новый элемент системы, обеспечивающий постоянную связь измерителя температуры прибора с блоком обработки данных глобальной управляющей программы. Постоянный режим связи позволяет в реальном масштабе времени проводить и обрабатывать данные, если режим коррекции включён.

При изготовлении прибора необходимо подготовить базу данных величин ТКС на каждой рабочей частоте.

Возможный алгоритм коррекции температурного дрейфа:

1) на ПК в программе EMS добавится функция включения и отключения температурной компенсации;

2) с датчика температуры (установленного внутри аппаратуры) приходит сигнал на микроконтроллер, указывающий температуру в данный момент времени;

3) при включённом режиме компенсации, микроконтроллер записывает данные с учётом температурной компенсации, то есть переводит каждое измеренное значение на значение при 20 °С;

4) посредством связи Bluetooth полученные данные передаются на ПК.

#### ***Заключение***

Разработан способ коррекции температурного дрейфа для геофизического прибора наземного индукционного частотного зондирования АЭМП-14 [1]. Определён характер зависимости измеряемого УЭС от температуры, выведена формула, описывающая данную зависимость, рассчитан температурный коэффициент сопротивления для каждой частоты. Способ основан на компенсации температурного дрейфа отклика по рассчитанным значениям ТКС для используемых частот.

Показано, что относительное изменение измеряемого сопротивления от номинального значения при изменении температуры окружающей среды характеризует зависимость полезного сигнала геофизического прибора (кажущегося электрического сопротивления) от его текущей температуры и измеряется в градусах Цельсия в минус первой степени ( $1/^\circ\text{C}$ ). Экспериментально установлен низкий уровень величины ТКС измеряемого сигнала, но он всегда больше нуля.

Данная методика позволяет повысить точность измерений кажущегося удельного электросопротивления среды.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ИНГГ СО РАН №0331-2019-0015*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Манштейн А.К. Аппаратурное и методическое обеспечение наземного электромагнитного индукционного многочастотного зондирования: Диссертация д-ра. тех. наук. - Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2012. - 182 с.
2. Манштейн А.К., Панин Г.Л., Тикунов С.Ю. Аппаратура частотного электромагнитного зондирования «ЭМС» // Геология и геофизика. - 2008. - Т. 49. - № 6. - С. 571-579.
3. Lavoué F, van der Kruk J, Rings J, Andre F, Moghadas D, Huisman J A, Lambot S, Wehermüller L, Vanderborght L and Vereecken H 2010 Electromagnetic induction calibration using apparent electrical conductivity modelling based on electrical resistivity tomography Near Surf. Geophys. V. 8 P. 553-561.
4. Robinson D.A., Lebron I., Lesch S.M. and Shouse P. Minimizing drift in electrical conductivity measurements in high temperature environments using the EM-38 // Soil Sci. Soc. Am. - 2004 - J. 68 – P. 339–345.
5. Xihe Tan Development of Electromagnetic Induction Measurement and Inversion Methods for Soil Electrical Conductivity Investigations // Schriften des Forschungszentrums Jülich – 2020 – V. 62.
6. Abdu H, Robinson D A and Jones S B 2007 Comparing bulk soil electrical conductivity determination using the DUALEM-1S and EM38-DD electromagnetic induction instruments Soil Sci. Soc. Am. J. 71 P. 189– 196.
7. Huang J, Minasny B, Whelan B M, McBratney M B and Triantafyllis J 2017 Temperature-dependent hysteresis effects on EM induction instruments: An example of single-frequency multi-coil array instruments Comput. Electron. Agr. 132 P. 76-85.
8. Прохоров А.М. Большая советская энциклопедия : [в 30 т.] // М. - 1969—1978 - 3-е изд.
9. Привалов И.И. Аналитическая геометрия // М.: Наука - 1966. – 46 - 51 с.

#### REFERENCES

1. Manshtejn A.K. Apparaturnoe i metodicheskoe obespechenie nazemnogo elektromagnitnogo indukcionnogo mnogochastotnogo zondirovaniya: - Novosibirsk: IGGP SBRAS, 2012. - 182 s.
2. Manshtejn A.K., Panin G.L., Tikunov S.YU. Apparatura chastotnogo elektromagnitnogo zondirovaniya «EMS» // Geologiya i geofizika. - 2008. - Т. 49. - № 6. - S. 571-579.
3. Lavoué F, van der Kruk J, Rings J, Andre F, Moghadas D, Huisman J A, Lambot S, Wehermüller L, Vanderborght L and Vereecken H 2010 Electromagnetic induction calibration using apparent electrical conductivity modelling based on electrical resistivity tomography Near Surf. Geophys. Vol. 8 P. 553-561.
4. Robinson D.A., Lebron I., Lesch S.M. and Shouse P. Minimizing drift in electrical conductivity measurements in high temperature environments using the EM-38 // Soil Sci. Soc. Am. - 2004 - J. 68 – P. 339–345.
5. Xihe Tan Development of Electromagnetic Induction Measurement and Inversion Methods for Soil Electrical Conductivity Investigations // Schriften des Forschungszentrums Jülich – 2020 – V. 62.



6. Abdu H, Robinson D A and Jones S B 2007 Comparing bulk soil electrical conductivity determination using the DUALEM-1S and EM38-DD electromagnetic induction instruments Soil Sci. Soc. Am. J. 71 P. 189– 196.
7. Huang J, Minasny B, Whelan B M, McBratney M B and Triantafyllis J 2017 Temperature-dependent hysteresis effects on EM induction instruments: An example of single-frequency multi-coil array instruments Comput. Electron. Agr. 132 P. 76-85.
8. Prohorov A.M. Bol'shaya sovetskaya enciklopediya : [v 30 t.] // М. - 1969—1978 - 3-e izd.
9. Privalov I.I. Analiticheskaya geometriya // М.: Nauka - 1966. – 46 - 51 s.

© А. К. Манитейн, Е. С. Хлыстун, 2021