

# Лабораторная работа 3.3.5

## Эффект Холла в металлах

Шерхалов Денис Б02-204  
Фаттахов Марат Б02-204

2 декабря 2023 г.

**Цель работы:** измерение подвижности и концентрации носителей заряда в металлах.

**Оборудование:** электромагнит с источником питания, источник постоянного тока, микровольтметр Ф116/16 амперметры, милливеберметр, образцы из меди, серебра и цинка.

### 1. Введение

Одновременное исследование эффекта Холла и проводимости позволяет находить плотность носителей заряда и их подвижность. Суть эффекта Холла состоит в следующем. Пусть через однородную пластину металла вдоль оси  $x$  течет ток  $I$ . Если эту пластину поместить в магнитное поле, направленное по оси  $y$ , то между гранями появится разность потенциалов. На электрон, движущийся со скоростью  $\mathbf{v}$  в электромагнитном поле, действует сила Лоренца.

$$\mathbf{F}_л = -e\mathbf{E} - e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

В нашем случае сила, обусловленная вторым слагаемым, направлена вдоль оси  $z$ .

$$F_B = e|v_x|B$$

Под действием этой силы электроны отклоняются к грани Б, заряжая ее отрицательно. При этом на грани А накапливаются нескомпенсированные положительные заряды, что приводит к возникновению электрического поля  $E_z$ , направленного от А к Б, которое действует на электроны силой  $F_E = eE_z$ , направленной против силы  $F_B$ . В стационарном режиме  $F_E$  уравнивает  $F_B$ , и накопление зарядов на боковых гранях прекращается. Из условия равновесия найдем:

$$E_z = |v_x|B$$

С полем  $E_z$  связана разность потенциалов  $U_{AB}$  между гранями А и Б.

$$U_{AB} = -E_z l = -|v_x|Bl$$

Заметим, что сила тока

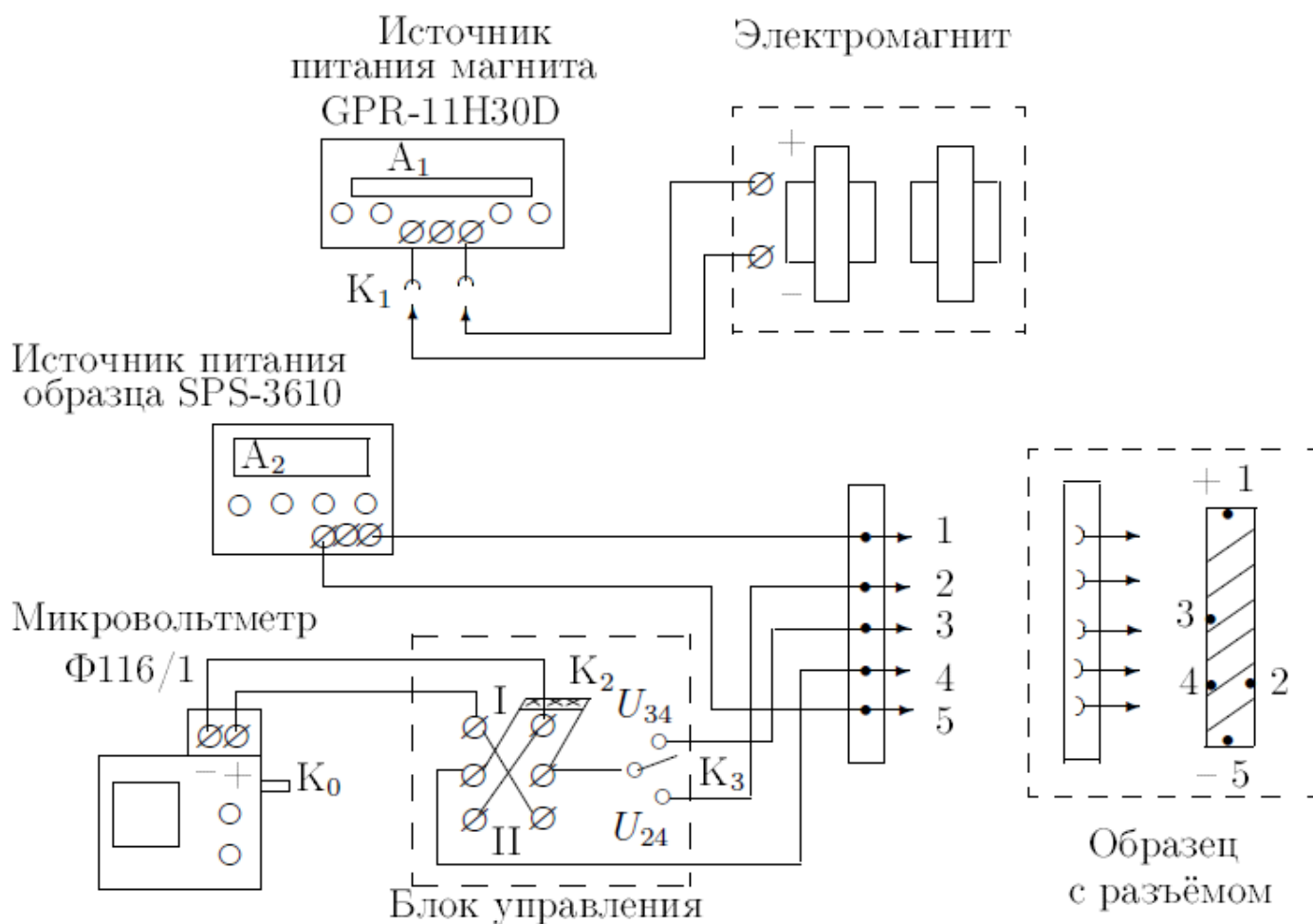
$$I = ne|v_x|l \cdot a,$$

отсюда найдем ЭДС Холла:

$$U_x = U_{AB} = -\frac{IB}{nea} = -R_x \cdot \frac{IB}{a},$$

где  $R_x = \frac{1}{ne}$  — постоянная Холла.

## Экспериментальная установка



**Рисунок 1.** Схема установки для исследования эффекта Холла в металлах.

В зазоре электромагнита создается постоянное магнитное поле, которое можно регулировать с помощью источника питания электромагнита.

Иногда контакты 2 и 4 вследствие неточности подпайки не лежат на одной эквипотенциали, и тогда напряжение между ними связано не только с эффектом Холла, но и с омическим напряжением, вызванным протеканием основного тока через образец.

Неточности измерений можно избежать путем фиксирования этого омического напряжения при нулевом значении силы тока и отсчитывании от него Холловского напряжения.

$$\varepsilon_x = U_{24} \pm U_0$$

Измерив ток в образце и напряжение  $U_{34}$  между контактами 3 и 4 в отсутствии магнитного поля, можно, зная параметры образца, рассчитать проводимость материала образца по очевидной формуле:

$$\sigma = \frac{IL_{34}}{U_{34}al}$$

## 2. Ход работы

### 2.1. Калибровка

Проводим измерение зависимости магнитного потока от величины силы тока. Результаты приведены в таблице и на графике ниже.

	$I_M, A$	$\sigma_{I_M}, A$	$B, \text{мТл}$	$\sigma_B, \text{мТл}$
1	0,19	0,01	252	5
2	0,37	0,01	455	10
3	0,56	0,01	678	10
4	0,75	0,01	940	50
5	0,94	0,01	1070	50
6	1,13	0,01	1150	50

Таблица 1.  $B = f(I_M)$

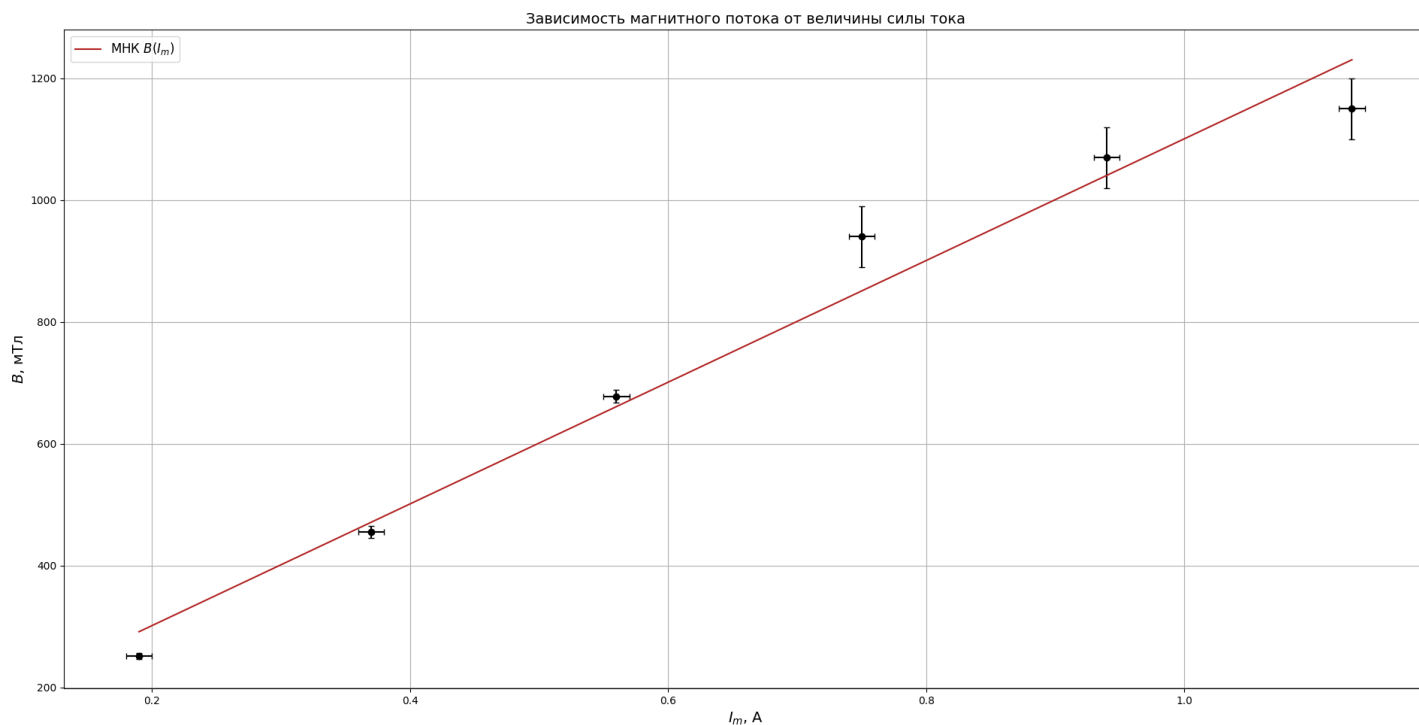


График 1. Нахождение  $B = f(I_M)$

### 2.2. Медь

Для начала отметим, что при измерении меди  $75 \text{ дел} = 3 \text{ мкВ}$

Проводим измерения ЭДС Холла. Для этого вставляем образец в зазор выключенного электромагнита и определяем  $U_0$  между контактами 2 и 4. Это значение следует принять за 0.

Далее включаем электромагнит и измеряем  $U = f(I_M)$  для образца из меди.

Проводим серию для 8 значений тока через образец.

То же делаем для образца из цинка при одном фиксированном значении тока через образец.

Определяем знак носителей заряда для меди – (+).

$$L_{3,4} = 6 \text{ мм} \quad a = 0.05 \text{ мм} \quad l = 8 \text{ мм}$$

Таблица 1: Для тока через материал  $I = 0.20$  А

	$(I = 0.20 \pm 0.01)$ А, $U_0 = (11 \pm 1)$ ед.						
	$I_M$ , А	$\sigma_{I_M}$ , А	$B$ , мТл	$\sigma_B$ , мТл	$U$ , ед.	$U$ , нВ	$\sigma_U$ , нВ
1	0.19	0.01	190	11	11	440	20
2	0.37	0.01	370	13	12	480	20
3	0.56	0.01	559	14	14	560	20
4	0.75	0.01	749	15	15	600	20
5	0.94	0.01	939	17	16	640	20
6	1.13	0.01	1129	18	16	640	20
7	1.28	0.01	1279	19	16	640	20

Таблица 2: Для тока через материал  $I = 0.35$  А

	$(I = 0.35 \pm 0.01)$ А, $U_0 = (10 \pm 1)$ ед.						
	$I_M$ , А	$\sigma_{I_M}$ , А	$B$ , мТл	$\sigma_B$ , мТл	$U$ , ед.	$U$ , нВ	$\sigma_U$ , нВ
1	0.19	0.01	190	11	12	480	20
2	0.37	0.01	370	13	14	560	20
3	0.56	0.01	559	14	16	640	20
4	0.75	0.01	749	15	18	720	20
5	0.94	0.01	939	17	19	760	20
6	1.13	0.01	1129	18	20	800	20
7	1.26	0.01	1259	19	21	840	20

Таблица 3: Для тока через материал  $I = 0.50$  А

	$(I = 0.50 \pm 0.01)$ А, $U_0 = (10 \pm 1)$ ед.						
	$I_M$ , А	$\sigma_{I_M}$ , А	$B$ , мТл	$\sigma_B$ , мТл	$U$ , ед.	$U$ , нВ	$\sigma_U$ , нВ
1	0.19	0.01	190	11	14.5	580	20
2	0.37	0.01	370	13	18	720	20
3	0.56	0.01	559	14	21	840	20
4	0.75	0.01	749	15	24	960	20
5	0.94	0.01	939	17	26	1040	20
6	1.13	0.01	1129	18	27	1080	20
7	1.26	0.01	1259	19	28	1120	20

Таблица 4: Для тока через материал  $I = 0.65$  А

	$(I = 0.65 \pm 0.01)$ А, $U_0 = (11 \pm 1)$ ед.						
	$I_M$ , А	$\sigma_{I_M}$ , А	$B$ , мТл	$\sigma_B$ , мТл	$U$ , ед.	$U$ , нВ	$\sigma_U$ , нВ
1	0.19	0.01	190	11	15.5	620	20
2	0.37	0.01	370	13	19	760	20
3	0.56	0.01	559	14	24	960	20
4	0.75	0.01	749	15	28	1120	20
5	0.94	0.01	939	17	30	1200	20
6	1.13	0.01	1129	18	32	1280	20
7	1.26	0.01	1259	19	33	1320	20

Таблица 5: Для тока через материал  $I = 0.80$  А

	$(I = 0.80 \pm 0.01)$ А, $U_0 = (12 \pm 1)$ ед.						
	$I_M$ , А	$\sigma_{I_M}$ , А	$B$ , мТл	$\sigma_B$ , мТл	$U$ , ед.	$U$ , нВ	$\sigma_U$ , нВ
1	0.19	0.01	190	11	17	680	20
2	0.37	0.01	370	13	23	920	20
3	0.56	0.01	559	14	28	1120	20
4	0.75	0.01	749	15	32	1280	20
5	0.94	0.01	939	17	36	1440	20
6	1.16	0.01	1159	18	38	1520	20
7	1.26	0.01	1259	19	39	1560	20

Таблица 6: Для тока через материал  $I = 0.95$  А

	$(I = 0.95 \pm 0.01)$ А, $U_0 = (13 \pm 1)$ ед.						
	$I_M$ , А	$\sigma_{I_M}$ , А	$B$ , мТл	$\sigma_B$ , мТл	$U$ , ед.	$U$ , нВ	$\sigma_U$ , нВ
1	0.19	0.01	190	11	19	760	20
2	0.37	0.01	370	13	25	1000	20
3	0.56	0.01	559	14	32	1280	20
4	0.74	0.01	739	15	38	1520	20
5	0.94	0.01	939	17	42	1680	20
6	1.16	0.01	1159	18	45	1800	20
7	1.25	0.01	1249	19	46	1840	20

Таблица 7: Для тока через материал  $I = 1.10$  А

	$(I = 1.10 \pm 0.01)$ А, $U_0 = (14 \pm 1)$ ед.						
	$I_M$ , А	$\sigma_{I_M}$ , А	$B$ , мТл	$\sigma_B$ , мТл	$U$ , ед.	$U$ , нВ	$\sigma_U$ , нВ
1	0.19	0.01	190	11	21	840	20
2	0.37	0.01	370	13	28	1120	20
3	0.56	0.01	559	14	36	1440	20
4	0.74	0.01	739	15	43	1720	20
5	0.94	0.01	939	17	47	1880	20
6	1.16	0.01	1159	18	50	2000	20
7	1.25	0.01	1249	19	51	2040	20

Таблица 8: Для тока через материал  $I = 1.25$  А

	$(I = 1.25 \pm 0.01)$ А, $U_0 = (-6 \pm 1)$ ед.						
	$I_M$ , А	$\sigma_{I_M}$ , А	$B$ , мТл	$\sigma_B$ , мТл	$U$ , ед.	$U$ , нВ	$\sigma_U$ , нВ
1	0.19	0.01	190	11	23	920	20
2	0.37	0.01	370	13	32	1280	20
3	0.56	0.01	559	14	41	1640	20
4	0.75	0.01	749	15	49	1960	20
5	0.93	0.01	929	17	53	2120	20
6	1.14	0.01	1139	18	57	2280	20
7	1.24	0.01	1239	19	58	2320	20

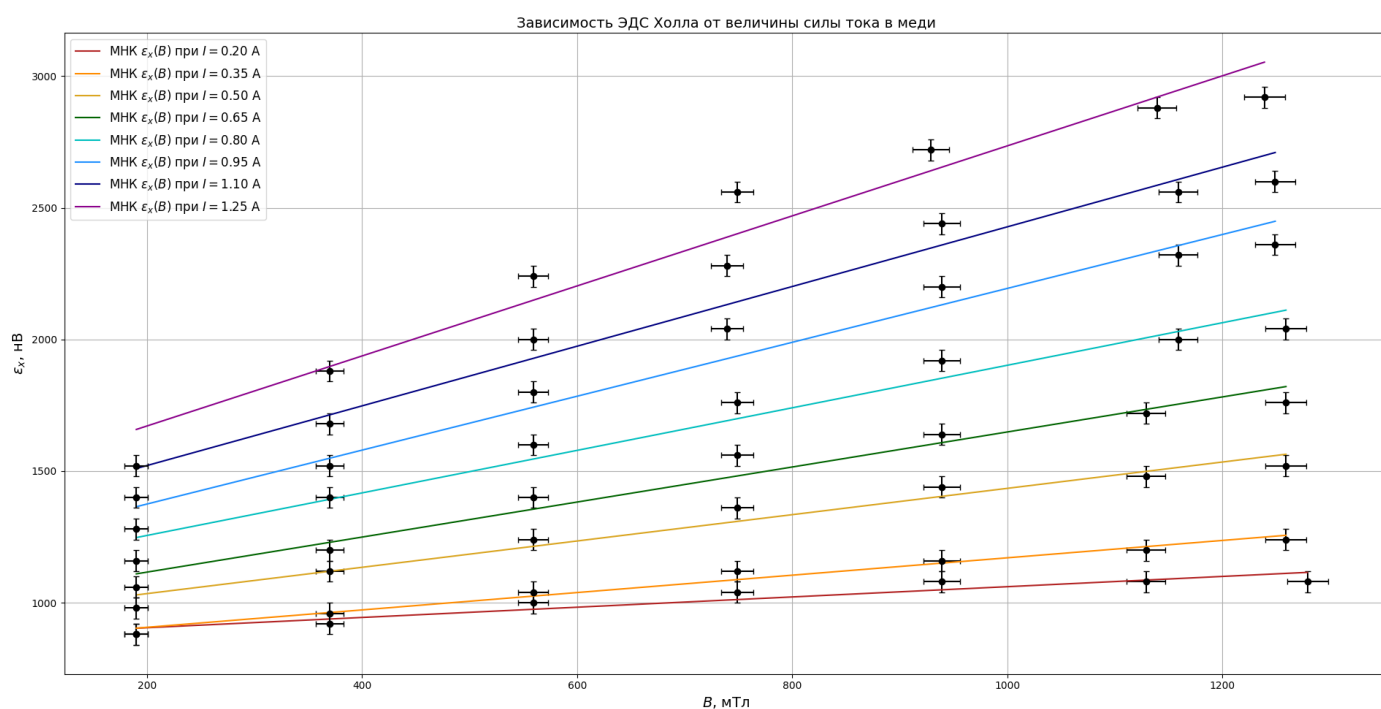


Рис. 1: График  $\varepsilon_x = f(B)$  для меди

Далее находим функцию зависимости  $k = f(I)$ , где  $k$  - коэффициент угла наклона для каждого из токов.

Таблица 9: Функция  $k = f(I)$

	$I$ , А	$\sigma_I$ , А	$k$ , $\frac{\text{мкВ}}{\text{Тл}}$	$\sigma_k$ , $\frac{\text{мкВ}}{\text{Тл}}$
1	0.20	0.01	0.195	0.005
2	0.35	0.01	0.330	0.005
3	0.50	0.01	0.500	0.005
4	0.65	0.01	0.665	0.005
5	0.80	0.01	0.808	0.005
6	0.95	0.01	1.024	0.005
7	1.10	0.01	1.133	0.005
8	1.25	0.01	1.330	0.005

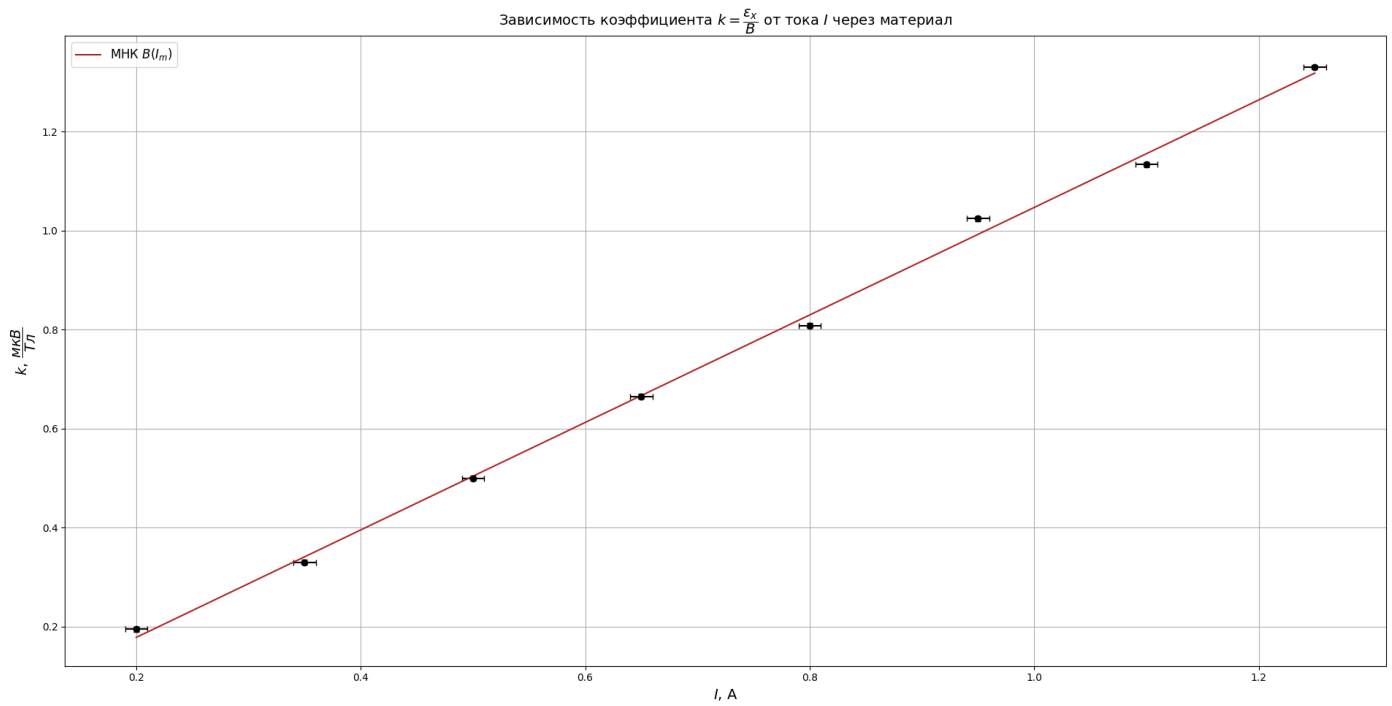


Рис. 2: График  $k = f(I)$

Из угла наклона графика зависимости  $k = f(I)$  мы получаем, что угол наклона этого графика  $K^{Cu} = (1.08 \pm 0.02) \frac{\text{мкОм}}{\text{Тл}}$

Из этого мы получаем, что из формулы во введении следует, что

$$R_x^{Cu} = -K^{Cu} \cdot a = -(5.4 \pm 0.1) \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

Как видим, полученное нами значение хорошо совпадает с табличным  $R_x^{Cu, th} = -5.5 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$

### 2.3. Цинк

Для начала отметим, что при измерении цинка  $75 \text{ дел} = 7.5 \text{ мкВ}$ . Определяем знак носителей заряда для цинка – (-).

$$L_{3,4} = 3.5 \text{ мм} \quad a = 0.12 \text{ мм} \quad l = 9 \text{ мм}$$

Таблица 10: Для тока через материал  $I = 1.00 \text{ А}$

	$(I = 1.00 \pm 0.01) \text{ А}, \quad U_0 = (13 \pm 1) \text{ ед.}$						
	$I_m, \text{ А}$	$\sigma_{I_m}, \text{ А}$	$B, \text{ мТл}$	$\sigma_B, \text{ мТл}$	$U, \text{ ед.}$	$U, \text{ нВ}$	$\sigma_U, \text{ нВ}$
1	0.19	0.01	190	11	16	1600	50
2	0.37	0.01	370	13	19	1900	50
3	0.56	0.01	559	14	22	2200	50
4	0.74	0.01	739	15	24	2400	50
5	0.93	0.01	929	17	26	2600	50
6	1.16	0.01	1159	18	27	2700	50
7	1.25	0.01	1249	19	28	2800	50

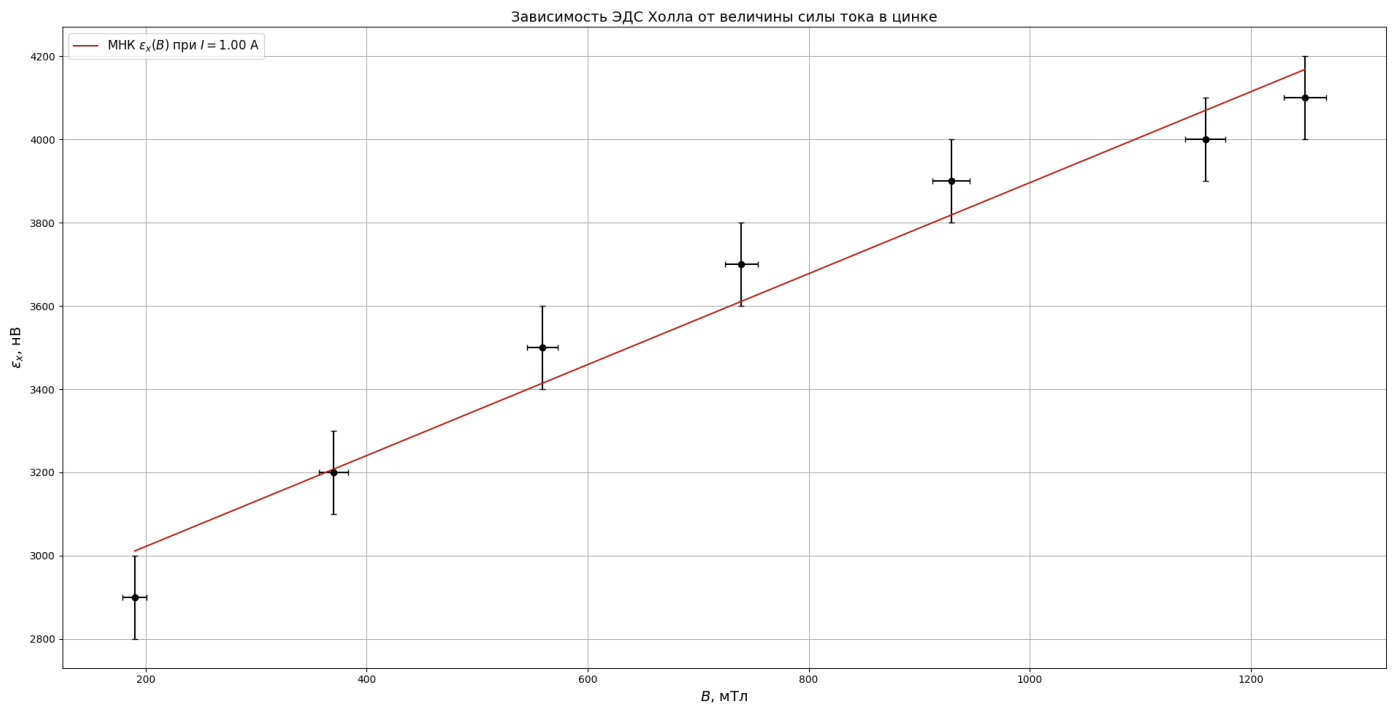


Рис. 3: График  $\varepsilon_x = f(B)$  для цинка

Теперь ищем то же самое для цинка:

$$K^{Zn} = (1.1 \pm 0.3) \frac{\text{мкВ}}{\text{Тл}}$$

$$R_x^{Zn} = -\frac{K^{Zn} \cdot a}{I} = (1.3 \pm 0.4) \cdot 10^{-10} \frac{\text{М}^3}{\text{Кл}}$$

Сравнивая с табличным значением, видим, что наше значение, с учетом погрешности, совпадает с табличным  $R_x^{Zn, th} = +1,04 \cdot 10^{-10} \frac{\text{М}^3}{\text{Кл}}$

## 2.4. Серебро

Для начала отметим, что при измерении серебра  $75 \text{ дел} = 1.5 \text{ мкВ}$ . Определяем знак носителей заряда для серебра – (+) .

$$L_{3,4} = 15 \text{ мм} \quad a = 0.09 \text{ мм} \quad l = 11 \text{ мм}$$



Таблица 11: Для тока через материал  $I = 1.00$  А

	$(I = 1.00 \pm 0.01)$ А, $U_0 = (-3 \pm 1)$ ед.						
	$I_M$ , А	$\sigma_{I_M}$ , А	$B$ , мТл	$\sigma_B$ , мТл	$U$ , ед.	$U$ , нВ	$\sigma_U$ , нВ
1	0.19	0.01	190	11	7	140	10
2	0.37	0.01	370	13	19	380	10
3	0.56	0.01	559	14	30	600	10
4	0.74	0.01	739	15	40	800	10
5	0.93	0.01	929	17	47	940	10
6	1.16	0.01	1159	18	51	1020	10
7	1.25	0.01	1249	19	52	1040	10

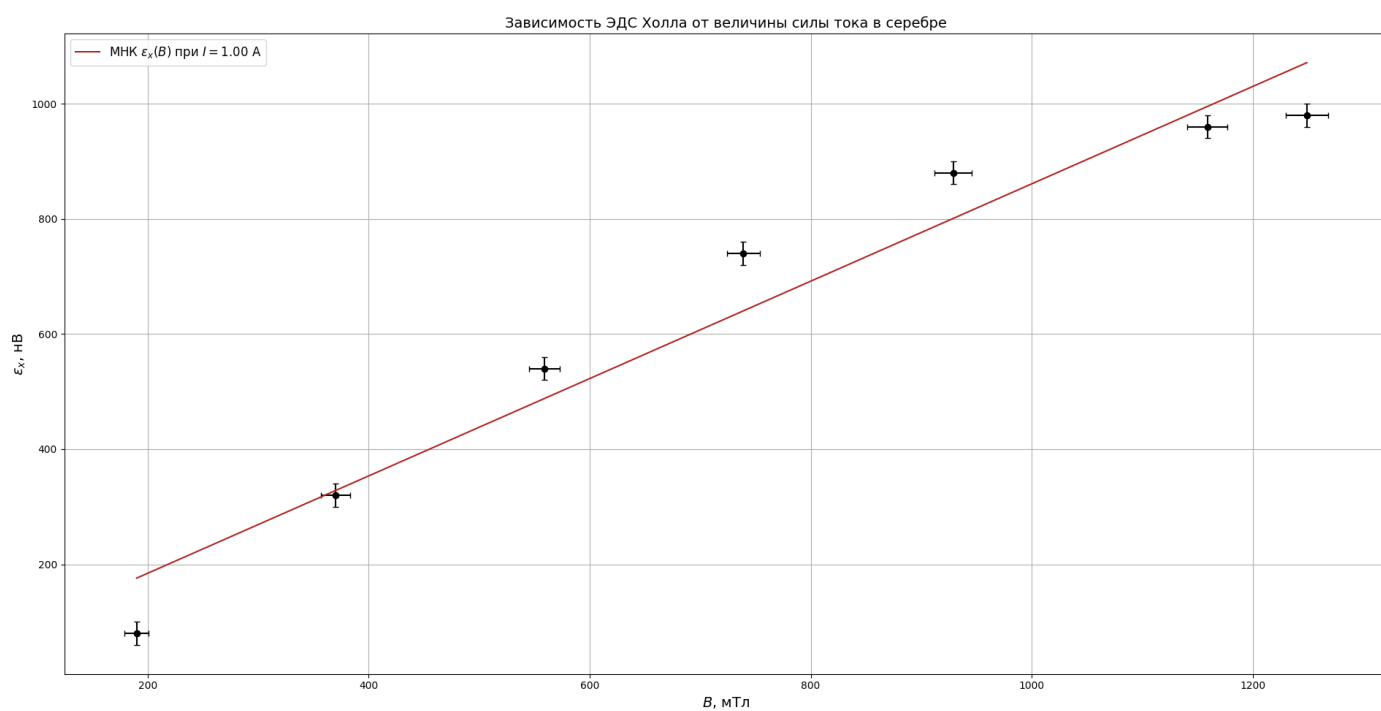


Рис. 4: График  $\varepsilon_x = f(B)$  для серебра

Теперь ищем то же самое для серебра:

$$K^{Ag} = (0.85 \pm 0.15) \frac{\text{мкВ}}{\text{Тл}}$$

$$R_x^{Ag} = -\frac{K^{Ag} \cdot a}{I} = (-7.7 \pm 1.4) \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

Сравнивая с табличным значением, видим, что наше значение, с учетом погрешности, совпадает с табличным  $R_x^{Ag, th} = -0.9 \cdot 10^{-10} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$

## 2.5. Концентрация носителей тока и удельная проводимость

Далее рассчитаем концентрацию носителей тока по формуле (6)

Рассчитаем удельную проводимость  $\sigma$  для образцов по формуле (7).

Используя найденные значения рассчитываем подвижность носителей по формуле

$$b = \frac{\sigma}{n \cdot e} = R_x \cdot \sigma$$

Занесём данные в таблицу

Металл	$R \pm \Delta R, 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$	Табл. $R, 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$	Знак	$n \pm \Delta n, 10^{30} \frac{1}{\text{м}^3}$	$\sigma \pm \Delta \sigma, 10^8 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$	$b, \frac{\text{см}^2}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$
Медь	$-5,4 \pm 0,1$	-5,5	+	$-0,12 \pm 0,01$	$0,48 \pm 0,06$	$26 \pm 3$
Цинк	$13 \pm 4$	10,4	–	$0,05 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,01$	$9,1 \pm 2,8$
Серебро	$-7,7 \pm 1,4$	-9.0	+	$-0,08 \pm 0,01$	$0,40 \pm 0,05$	$31 \pm 6$

### 3. Вывод

Найденные нами постоянные Холла с учётом погрешности совпадают с табличными. Знак этой постоянной показывает, что основными носителями заряда в меди и серебре являются электроны, а в цинке дырки.