

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ

6.1 Эффект Мессбауэра

выполнил студент Б04-852 группы ФЭФМ

Яромир Водзяновский

Содержание

1	Цель работы	2
2	Теория	2
2.1	Свободные ядра атомов	2
2.2	Ядра атомов в кристаллической решетке	3
3	Экспериментальная установка	4
4	Ход работы	5
4.1	Измерение спектра источника и его анализ	5
4.2	Измерение резонансного поглощения	5

1 Цель работы

- С помощью метода доплеровского сдвига мессбауэрской линии поглощения исследуется резонансное поглощение γ -лучей, испускаемых ядрами олова ^{119}Sn в соединении BaSnO_3 при комнатной температуре.
- Определить положение максимума резонансного поглощения, его величины, а также экспериментальной ширины линии $\Gamma_{\text{экс}}$.
- Оценить время жизни возбужденного состояния ядра ^{119}Sn .

2 Теория

2.1 Свободные ядра атомов

Нуклоны в ядре могут находиться на разных энергетических уровнях, самый низкий - основной, а остальные - возбужденные. Ядра могут спонтанно переходить на более низкие энергетические уровни, вследствие чего появляется γ -излучение.

В отличие от основного уровня, все возбужденные уровни имеют конечную ширину. Если отложим по оси абсцисс энергию ядра, а по оси ординат - вероятность найти ядро в состоянии с данной энергией, то ширина кривой, измеренная на половине высоты, называется шириной линии Γ и она связана со средним временем жизни τ возбужденного состояния:

$$\Gamma \cdot \tau \approx \hbar \quad (1)$$

Ядро также может поглотить фотон и перейти на более высокое состояние, если энергия фотона равна разности энергий между состояниями. Этот процесс носит резонансный характер.

Не так просто обнаружить этот эффект, т.к. энергия E_γ , уносимая γ -квантом, оказывается меньше энергии E_0 перехода между уровнями. Также часть энергии уносится ядром, вследствие отдачи оно начинает двигаться в противоположную γ -кванту сторону.

По ЗСИ ядро получит импульс равный импульсу фотона, тогда энергия отдачи R :

$$R = \frac{p^2}{M_{\text{я}}} = \frac{E_\gamma^2}{2M_{\text{я}}c^2} \quad (2)$$

Для олова $E_0 = 23.8 \text{ кэВ}$, $R \approx 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$. На рис. 1 видно, как сдвигается линия поглощения вправо, а испускания - влево.

Резонансное поглощение возможно, если спектры испускания и поглощения перекрываются:

$$2R \leq \Gamma \quad (3)$$

Однако это условие почти никогда не выполняется для γ -переходов в свободных ядрах.

Можно компенсировать энергетический сдвиг с помощью эффекта Доплера. Для этого будем двигать излучающие и поглощающие ядра относительно друг друга со скоростью:

$$V = c \cdot 2R/E_\gamma \approx 60 \text{ м/с} \quad (4)$$

Ширина линии складывается из собственной и доплеровской ширины, основную роль играет доплеровская, связанная с тепловым движением атомов. Доплеровский сдвиг:

$$D = 2\sqrt{Rk_{\text{Б}}T} \approx 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ эВ} \quad (5)$$

Доплеровская ширина оказывается больше собственной и больше сдвига R . В результате доплеровского уширения частично линии будут перекрываться (рис. 2) и будет доля γ -квантов, для которых отдача R скомпенсирована и возможно резонансное поглощение.

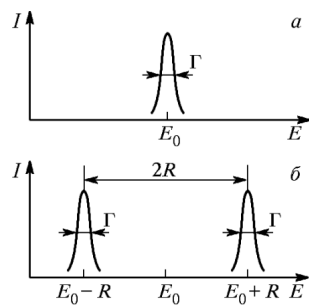


Рис. 1: Энергетическое распределение, характеризующее возбужденное состояние (а), и спектр испускания и поглощения из-за отдачи.

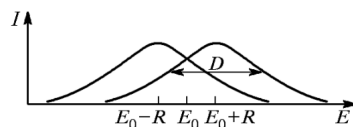
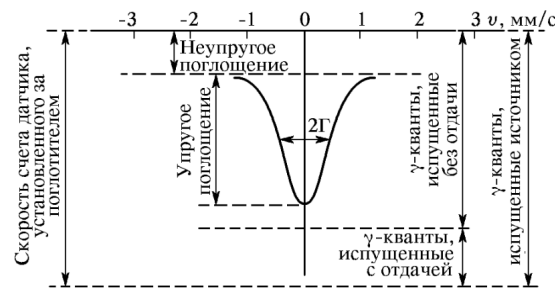


Рис. 2: Перекрывание линий испускания и поглощения вследствие доплеровского сдвига

Рис. 3: Спектр упругого резонансного поглощения γ -квантов.

2.2 Ядра атомов в кристаллической решетке

Энергия, необходимая для смещения ядра $10 \div 30$ эВ. При испускании γ -квантов с $E < 1$ МэВ энергия отдачи недостаточна для вырывания ядра из кристаллической решетки, энергия отдачи переходит в звуковые колебания, переносимые фононами. Процесс генерации фононов тем легче, чем их больше, то есть при больших температурах. В формуле (2) вместо массы ядра будет масса всего кристалла и энергия отдачи понизиться на $10 \div 20$ порядков и становится очень малой.

Эффект Мессбауэра - испускание и поглощение γ -квантов в твердых телах без рождения фононов.

Вероятность эффекта оценивается выражением:

$$f = e^{-4\pi^2 \langle u^2 \rangle / \lambda^2} \quad (6)$$

$\langle u^2 \rangle$ - среднеквадратичное смещение ядер в процессе тепловых колебаний решетки (в направлении вылета γ -кванта), λ - длина волны излучения. Видно, что вероятность уменьшается с ростом температуры и растет с уменьшением длины волны.

Эффект Мессбауэра ограничен областью малых энергий γ -лучей ≈ 200 кэВ. Линия резонансного мессбауэрского поглощения не размыта тепловым движением и имеет малую ширину.

Отсутствие доплеровского уширения из-за беспорядочно тепловое движение атомов связано с тем, что частота тепловых колебаний много больше, чем частота жизни мессбауэрсских ядерных уровней, поэтому за время испускания γ -кванта ядро успевает много раз сменить направление скорости и среднее значение равно нулю.

Гамма излучение пропускается через резонансный поглотитель, где находятся ядра ^{119}Sn , тут происходит взаимодействие квантов с электронами за счет фотоэффекта и эффекта Комптона и взаимодействие с ядрами. Интенсивность проходящего через поглотитель излучения уменьшается как:

$$e^{-n_e \sigma_e} e^{-n f \sigma(E)} \quad (7)$$

n_e , n - число электронов и ядер поглотителя на 1 см^2 поглотителя, f - вероятность Мессбауэра, σ_e , $\sigma(E)$ - сечение взаимодействия с электронами среды и сечение резонансного поглощения. Сечения резонансного поглощения имеет вид лоренца:

$$\sigma(E) \propto \frac{(\Gamma/2)^2}{(E - E_0)^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (8)$$

E_0 - энергия ядерного перехода, Γ - естественная ширина линии. Излучение, прошедшее через поглотитель, регистрируется сцинтилляционным спектрометром.

Наблюдать резонансное поглощение будем используя метод доплеровского сдвига, для создания которого поглотителю будет сообщена скорость порядка миллиметра в секунду.

Ядра источника и поглотителя находятся в идентичных кристаллах при одной температуре, то их линии полностью перекрываются и максимум поглощения при нулевой скорости (рис. 3).

Если ядра входят в состав химических соединений, то максимум линии поглощения будет наблюдаться при ненулевой скорости. Так энергия ядерного перехода зависит от электростатических сил взаимодействия ядра с окружающими электронами, что сравнительно с шириной линии упругого резонансного поглощения. Смещение максимума линии легко замечается и называется химическим сдвигом.

Для источника и поглотителя из разных хим. соединений смещение максимума по скорости:

$$v_p = \frac{\Delta E}{E_0} c \quad (9)$$

Величина амплитуды эффекта:

$$\varepsilon(v) = \frac{N(\infty) - N(v)}{N(\infty) - N_\Phi} \quad (10)$$

$N(v)$ - скорость счета квантов прошедших через поглотитель при скорости v , $N(\infty)$ - скорость счета квантов при достаточно большой скорости, когда резонансное поглощение отсутствует, N_Φ - скорость счета радиоактивного фона.

На опыте измеренная $\Gamma_{\text{эксп}}$ - результат наложения линий источника и поглотителя, в идеальных условиях ширина линии равна удвоенной естественной ширине 2Γ . Увеличение толщины поглотителя заметно уширяет резонансную линию, тк:

- Кванты, энергия которых вблизи максимума линии уже сильно поглощаются в тонких и ширина почти не имеет значения.
- Уширение линии может происходить и вследствие самопоглощения квантов в источнике.
- Аппаратурное уширение - вибрации источника
- Неравномерность скорости перемещения поглотителя

3 Экспериментальная установка

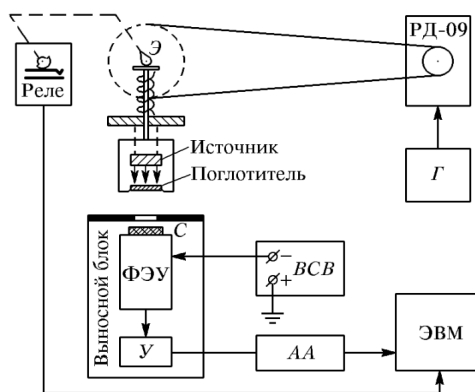


Рис. 4. Блок-схема установки для наблюдения эффекта Мессбауэра: Э — эксцентрик, С — сцинтилляционный кристалл NaI(Tl), У — усилитель, АА — одноканальный амплитудный анализатор, ЭВМ — персональный компьютер, Г — генератор для питания двигателя, РД-09 — двигатель с редуктором, БСВ — высоковольтный стабилизированный выпрямитель

Рис. 4

В работе используется источник γ -квантов радиоактивный изотоп олова ^{119m}Sn в виде соединения BaSnO_3 , распадается с излучением гамма-квантов ≈ 65 кэВ, переходя на первый возбужденный уровень (рис. 5). При переходе с первого уровня на основной излучается γ -квант 23.8 кэВ.

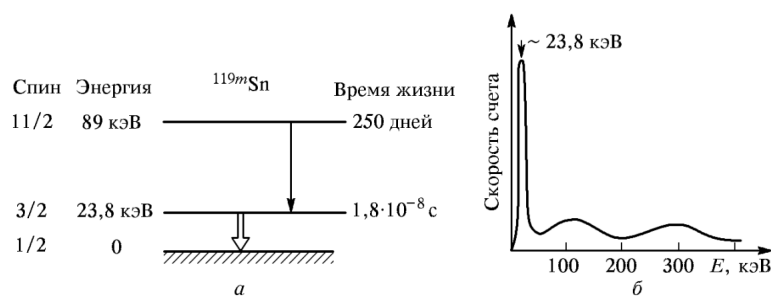


Рис. 5: Схема распада ^{119}Sn (а) ; спектр излучения источника BaSnO_3

На рис. 5б, показан спектр излучения источника. Видны также размытые пики на 100 кэВ и 300 кэВ. Для наблюдения эффекта нужно выделить основную линию из общего излучения, установив окно амплитудного анализатора.

4 Ход работы

4.1 Измерение спектра источника и его анализ

Цель - подобрать настройки анализатора импульса так, чтобы детектировались только γ -кванты с энергией 23.8 кэВ, исходящие от источника

1. Включим установку, все настроим. Установим ширину окна
2. Установим ширину окна 0.5 В
3. Измерим интенсивность излучения (скорость счета) двигая окно от 0 до 9.5 В
4. Результат занесем в таблицу 1 и нанесем на график (рис. 6)
5. Сделаем фит функцией Лоренца (Распределение Коши):

$$f(x) = \frac{1}{\pi\gamma \left(1 + \left(\frac{x-x_0}{\gamma}\right)^2\right)} \quad (11)$$

Но в нашем случае немног модернезируем его, чтомы можно было сделать фит:

$$f(x) = b - \frac{a}{1 + \left(\frac{x-d}{c/\alpha}\right)^2} \quad (12)$$

Где α - некий коэффициент определяющий вместе с коэффициентом c полуширину на полувысоте, α подбирается каждый раз исходя из прикидывания полуширины, чтобы помочь алгоритму подобрать коэффициенты. В итоге $2 \cdot c/\alpha = \Gamma_{\text{экс}}$. Коэффициент b определяет высоту аппроксимационной кривой. d - есть химический сдвиг.

Таблица 1

N, c^{-1}	674.6	270	386	919.3	1982.7	3375.3	4593.1	4787.1	3833.1	2405.3
U, В	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
N, c^{-1}	1205.9	538.4	215.8	109.4	79.8	55.9	46.4	36.6	29.7	
U, В	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	

6. По графику понимаем, что большая часть нужных нам квантов лежит в диапазоне от 2 до 6 В.

4.2 Измерение резонансного поглощения

Цель - измерить резонансное поглощение для 4х образцов

1. Время измерения 20 секунд.
2. Измерим фон = 14 1/с
3. Занесем в таблицу 2 параметры фитов:

Таблица 2

Поглотитель	a	σ_a , %	b, c^{-1}	σ_b , %	c, мм/с	σ_c , %	d, мм/с	σ_d , %	α
1	-3138.14	7.54	40332.52	0.25	-1.46	14.99	2.366	2.49	2
2	-3304.33	2.94	20085.86	0.19	0.32	5.50	2.31	0.84	0.5
3	-1873.44	4.89	8715.93	0.38	1.67	7.59	2.40	5.27	2
4	-12250.20	1.34	32588.94	0.06	0.92	1.42	-0.02	13.77	1

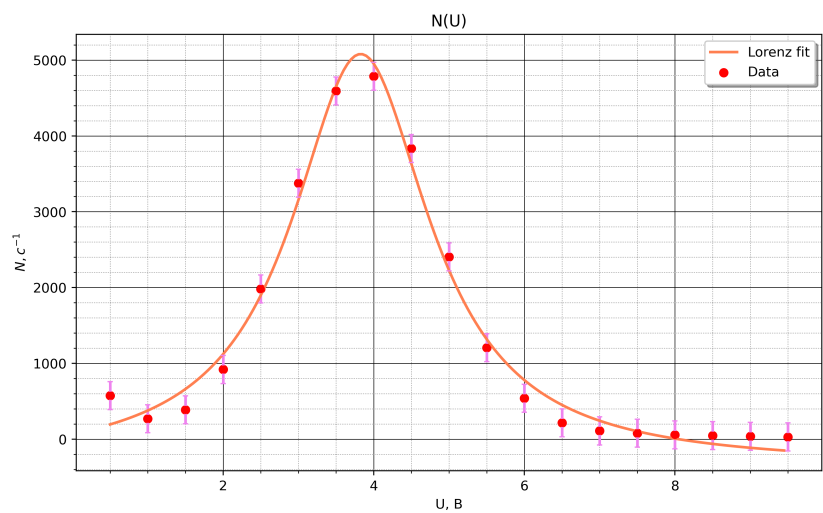


Рис. 6: Измеренный спектр источника

4. По полученным параметрам аппроксимации определим следующие величины (таблица 3):

Таблица 3

Поглотитель	Хим сдвиг, мм/с	Хим сдвиг, эВ	$\Gamma_{\text{эксп}}$, мм/с	$\Gamma_{\text{эксп}}$, эВ
1	2.366	$1.87 \cdot 10^{-7}$	1.46	$1.16 \cdot 10^{-7}$
2	2.31	$1.83 \cdot 10^{-7}$	1.28	$1.05 \cdot 10^{-7}$
3	2.40	$1.9 \cdot 10^{-7}$	1.67	$1.32 \cdot 10^{-7}$
4	-0.02	$1.58 \cdot 10^{-9}$	0.04	$3.17 \cdot 10^{-9}$

Величина химического сдвига в эВ:

$$\Delta E = E \frac{v}{c} \tag{13}$$

$E = 23.8 \text{ кэВ}$

Экспериментальная ширина линии $\Gamma_{\text{эксп}}$ в эВ:

$$\Gamma_{\text{эксп}} = 2\Gamma = E \frac{v}{c} \tag{14}$$

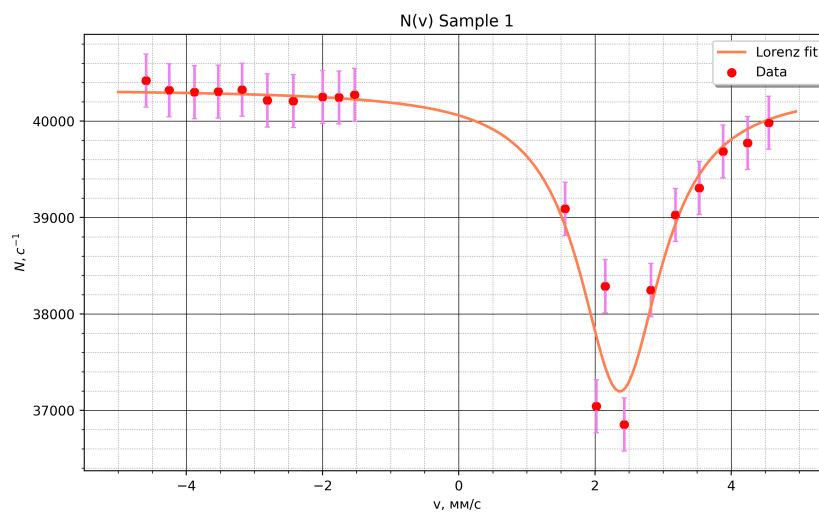


Рис. 7: Резонансное поглощение на 1-м образце

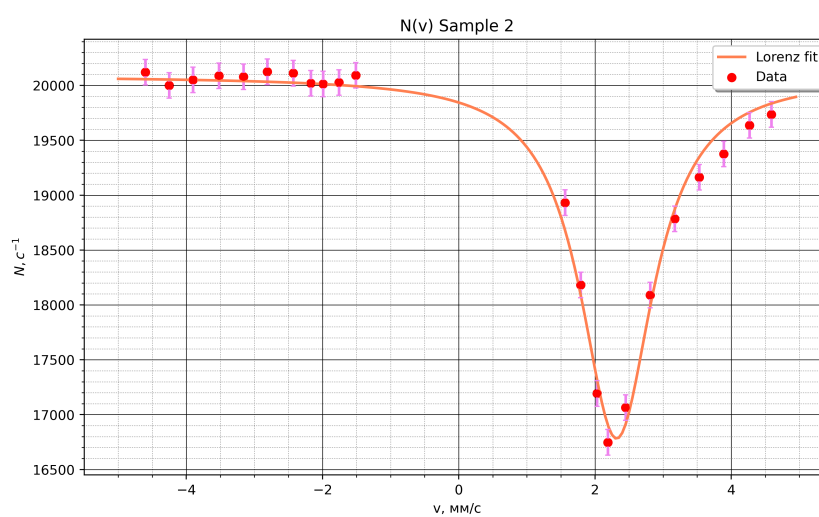


Рис. 8: Резонансное поглощение на 2-м образце

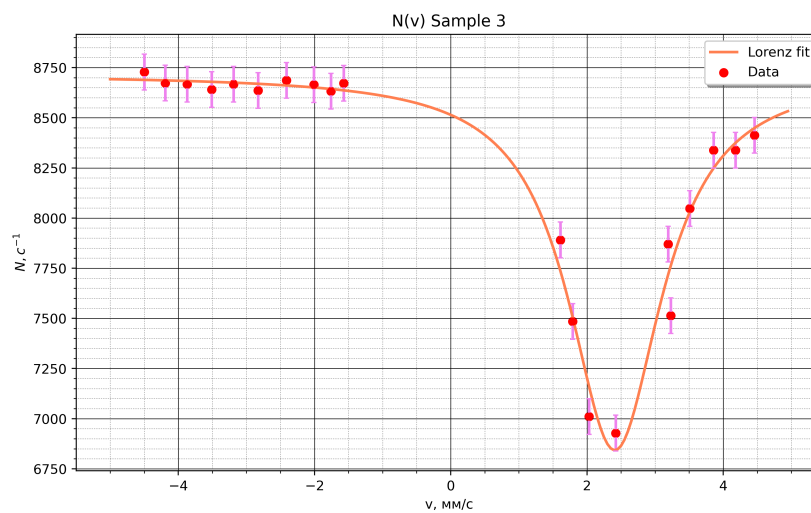


Рис. 9: Резонансное поглощение на 3-м образце

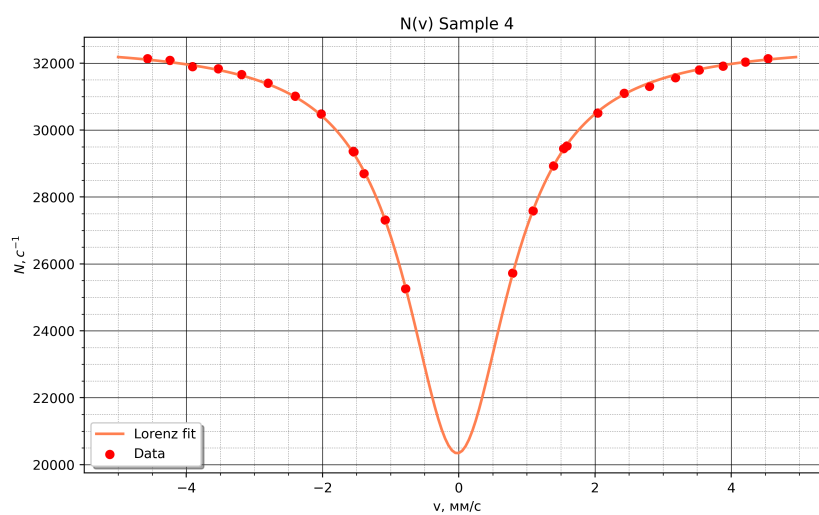


Рис. 10: Резонансное поглощение на 4-м образце

	N1	v1	N2	v2	N3	v3	N4	v4
0	40245.0	-1.76	20027.0	-1.76	8632.0	-1.76	25258.5	-0.78
1	38288.0	2.15	18182.0	1.79	7485.0	1.79	25726.9	0.79
2	40272.0	-1.53	20020.0	-2.17	8672.0	-1.57	27310.6	-1.08
3	39090.0	1.56	16748.0	2.19	7891.0	1.61	27585.5	1.09
4	40250.0	-2.00	20093.0	-1.51	8665.0	-2.01	28697.6	-1.39
5	37042.0	2.02	18932.0	1.56	7010.0	2.03	28928.6	1.39
6	40207.0	-2.43	20014.0	-1.99	8687.0	-2.41	29348.6	-1.54
7	36854.0	2.43	17193.0	2.03	6928.0	2.42	29447.4	1.54
8	40214.0	-2.81	20111.0	-2.43	8636.0	-2.83	29371.0	-1.55
9	38248.0	2.82	17065.0	2.45	7513.0	3.23	29527.0	1.59
10	40326.0	-3.18	20124.0	-2.81	8667.0	-3.19	30480.0	-2.02
11	39027.0	3.18	18090.0	2.81	7870.0	3.19	30511.0	2.04
12	40306.0	-3.53	20079.0	-3.16	8641.0	-3.51	31011.0	-2.40
13	39305.0	3.53	18784.0	3.17	8048.0	3.51	31103.0	2.43
14	40300.0	-3.88	20088.0	-3.52	8667.0	-3.87	31401.0	-2.80
15	39686.0	3.88	19163.0	3.53	8338.0	3.86	31309.0	2.80
16	40321.0	-4.25	20051.0	-3.90	8673.0	-4.19	31664.0	-3.19
17	39774.0	4.24	19376.0	3.89	8338.0	4.18	31565.0	3.18
18	40419.0	-4.59	20001.0	-4.25	8728.0	-4.50	31836.0	-3.53
19	39982.0	4.55	19636.0	4.27	8413.0	4.46	31799.0	3.53
20	NaN	NaN	20120.0	-4.60	NaN	NaN	31895.0	-3.91
21	NaN	NaN	19736.0	4.59	NaN	NaN	31910.0	3.88
22	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	32085.0	-4.24
23	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	32036.0	4.21
24	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	32138.0	-4.57
25	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	32138.0	4.54

Рис. 11: Общие данные поглощения