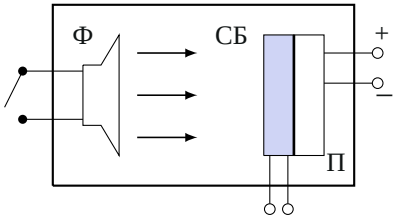
Солнечные батареи

Задача 2. [ВсОШ 2022/23, заключительный этап, 11 класс, практический тур, задача 2] «Солнечные батареи».

В настоящее время доля солнечных батарей в выработке электроэнергии быстро увеличивается. Это объясняет повышенный интерес к эффективности солнечных батарей и влияющим на неё факторам. Одним из таких факторов является температура. В данной работе предлагается исследовать влияние температуры на эффективность преобразования энергии светового излучения в электрическую энергию для небольшой солнечной батареи.



Перечень оборудования: бокс с фонариком (Ф), солнечной батареей (СБ), элементом Пельтье (П) и разъёмами для их подключения (см. рис.), мультиметр, потенциометр с максимальным сопротивлением 10 кОм, регулируемый источник питания для элемента Пельтье, два провода крокодил–крокодил, миллиметровая бумага.

Комментарии к оборудованию. *Элемент Пельтье* — термоэлектрический полупроводниковый преобразователь, между двумя поверхностями которого возникает разность температур при протекании через него электрического тока. В данной работе предлагается использовать элемент Пельтье только для нагрева СБ. Контакты элемента Пельтье (красный и чёрный провода) через специальный разъём подключаются к регулируемому блоку питания. Перед включением питания элемента Пельтье убедитесь, что регулятор напряжения находится в крайнем левом положении.

Фонарик — в качестве источника света используется светодиодный фонарик. Фонарик включается при нажатии кнопки переключателя. Питание фонарика осуществляется от USB ноутбука.

Солнечная батарея — полупроводниковое устройство, преобразующее энергию света в электрическую. При освещении СБ между её контактами возникает напряжение. Контакты СБ — два провода одинакового цвета с залуженными концами. Их подключение производится с помощью проводов крокодил–крокодил. На боксе приводится номер экспериментальной установки, который необходимо написать в начале работы, а также угловой коэффициент в зависимости напряжения холостого хода $U_{\text{хх}}$ от температуры СБ ($\Delta U_{\text{хх}}/\Delta T$). Обратите внимание, что с ростом температуры величина $U_{\text{хх}}$ снижается.

Регулирование и определение температуры СБ. Температуру предлагается регулировать при помощи элемента Пельтье посредством изменения напряжения на его выводах. Крепление СБ на поверхность элемента Пельтье осуществляется с помощью хорошо проводящего тепло термоскотча. Для определения температуры СБ используется линейность зависимости напряжения холостого хода от температуры $U_{\text{хх}}(T)$ (за $U_{\text{хх}}$ принимается напряжение на СБ при разомкнутых контактах и включённом фонарике) в диапазоне температур от $-10\,^{\circ}\text{C}$ до $+70\,^{\circ}\text{C}$. Если при включении фонарика напряжение $U_{\text{хх}}$ ниже 0,5 В, обратитесь к дежурному.

Задание.

1. Изменяя сопротивление нагрузки (потенциометра) при температуре помещения, исследуйте зависимость мощности СБ, отдаваемой во внешнюю цепь, от сопротивления нагрузки $P(R)$. Приведите график этой зависимости (не менее 15 точек). Определите максимальную мощность. Температура в помещении будет задана дополнительно. Порядок измерений следующий: при выключенном фонарике установите определённое сопротивление потенциометра; включите фонарик и как можно быстрее произведите измерение; после измерения напряжения сразу выключите фонарик. Если фонарик не выключать, то будет происходить дополнительный нагрев СБ.

2. Исследуйте зависимость максимальной мощности СБ, отдаваемой во внешнюю цепь, от температуры СБ (не менее 4-х значений температуры, включая комнатную). Постройте график зависимости максимальной мощности СБ от температуры $P_{\max}(T)$. Графики зависимости мощности от сопротивления нагрузки для отдельных серий измерения (как в п. 1) строить не обязательно. Необходимое количество точек для нахождения $P_{\max}(T)$ определите самостоятельно. Приведите использованные экспериментальные данные. Изменение температуры должно осуществляться путём изменения напряжения на элементе Пельтье. Имейте в виду, что равновесная температура при заданном напряжении устанавливается довольно долго (до 20 минут). Об установлении равновесия можно судить по прекращению значимых изменений напряжения холостого хода СБ (U_{xx}). Если вы после измерений при высоких температурах захотите повторить измерения при более низкой температуре, охлаждение также может занять значительное время. Учитывайте это, планируя эксперимент. Рекомендуемый диапазон изменения напряжения на выводах элемента Пельтье от 3 В до 6 В. Примерное значение напряжения отображается на блоке питания элемента Пельтье. Не превышайте рекомендуемое напряжение! В противном случае элемент Пельтье может выйти из строя. Замена элемента не предусмотрена.
3. В линейном приближении определите угловой коэффициент зависимости $P_{\max}(T)$.
4. В предложенной ниже таблице приведены средние дневные температуры в Сочи и в Чите за период весна–лето и суммарные инсоляции тех же городов за тот же период времени. Под инсоляцией в данном случае понимается суммарная энергия солнечного излучения, приходящаяся на единицу площади (за определённый период). Предположим, что в Сочи и в Чите расположены две одинаковые СБ, которые используются оптимальным способом. Найдите отношение энергий, которые вырабатываются этими батареями в Сочи и в Чите за период с марта по август. Считайте, что

вырабатываемая энергия СБ при заданной температуре прямо пропорциональна инсоляции. Используйте данные таблицы и результаты ваших измерений зависимости максимальной мощности СБ от температуры, эту зависимость считайте линейной в рассматриваемом диапазоне температур. Приведите формулы, которые вы использовали для вычислений. Сравните отношение энергий с отношением суммарных инсоляций.

Средняя дневная температура t (в °C) и суммарная инсоляция I оптимально расположенной площадки за месяц (в кВт·ч/м^2):

Сочи, 43,6° с.ш.	t	I	Чита, 52,0° с.ш.	t	I
Март	11,0	123,6	Март	−1,0	158,4
Апрель	14,9	138,6	Апрель	5,5	165,6
Май	20,2	176,7	Май	14,6	173,7
Июнь	25,0	203,7	Июнь	21,1	169,2
Июль	27,8	212,7	Июль	24,3	153,9
Август	28,8	188,7	Август	20,7	140,7

▲ **Решение. Что происходит.** Освещённая солнечная батарея (СБ) — источник тока: фототок $I_ф$ почти не зависит от напряжения, пока оно мало, а у напряжения холостого хода U_{xx} резко падает (так работает освещённый p–n-переход). Мощность во внешней цепи $P = UI$ при нагрузке R равна нулю и при $R \to 0$ ($U \to 0$), и при $R \to \infty$ ($I \to 0$), поэтому между ними есть максимум P_{max} — он и характеризует «эффективность» батареи. С ростом температуры U_{xx} падает, а ток почти не меняется, поэтому P_{max} уменьшается. План опыта: измерить $P(R)$ и найти P_{max} при комнатной температуре; повторить при нескольких температурах, а температуру определять не термометром, а по U_{xx}, у которого линейная зависимость от T; из $P_{max}(t)$ получить наклон и применить его к городам.

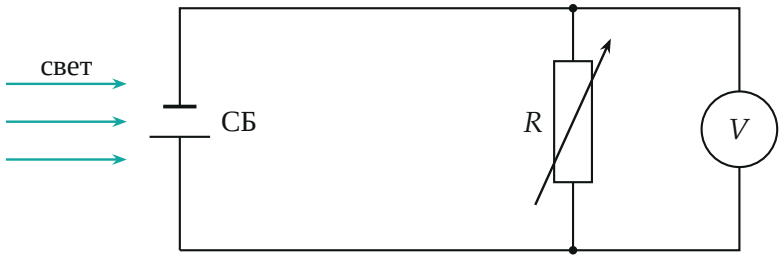
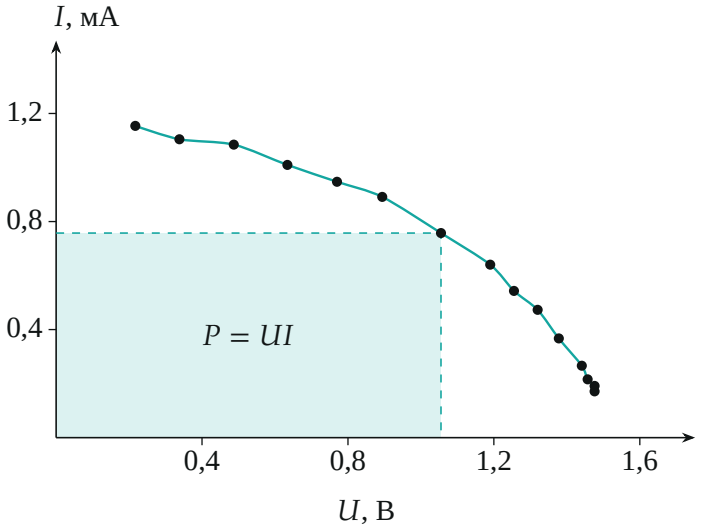


Схема измерения: СБ освещена фонариком, к ней подключён потенциометр R и параллельно ему вольтметр V. Элемент Пельтье под СБ (на схеме не показан) нагревает её. **Обозначения.** R — сопротивление потенциометра; U — напряжение на нём; $P = U^2/R$ — отдаваемая мощность; U_{xx} — напряжение холостого хода; t — температура СБ; I — месячная инсоляция; S — величина, пропорциональная выработанной энергии.

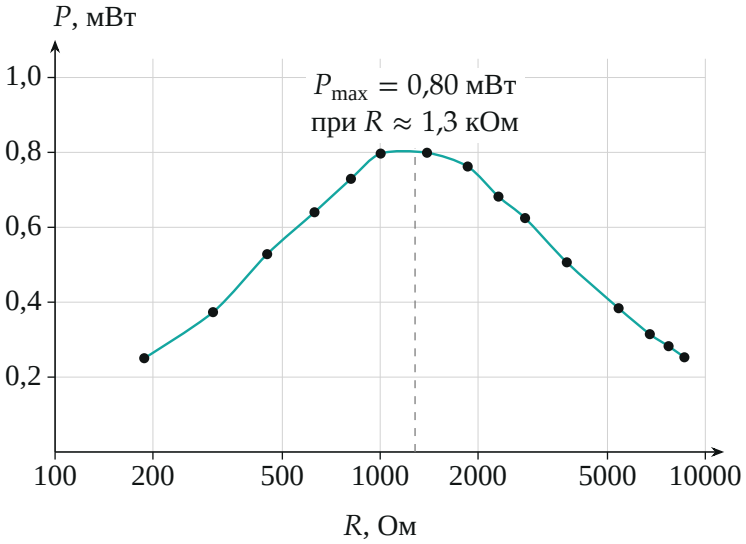
Пункт 1. Зависимость $P(R)$ при комнатной температуре. Сопротивление потенциометра измеряем омметром при отключённой СБ (иначе её ЭДС исказит показание). Затем подключаем потенциометр к СБ, на короткое время включаем фонарик и вольтметром измеряем U; сразу выключаем фонарик, чтобы свет не нагревал СБ. Мощность $P = U^2/R$ — ток отдельно измерять не нужно. 15 значений R (от 0,2 до 8,6 кОм, плотнее у максимума):

R, Ом	U, В	P, мВт	R, Ом	U, В	P, мВт
188	0,217	0,250	2310	1,255	0,682
306	0,338	0,373	2790	1,320	0,625
449	0,487	0,528	3750	1,378	0,506
628	0,634	0,640	5410	1,441	0,384
813	0,770	0,729	6750	1,457	0,314
1003	0,894	0,797	7710	1,476	0,283
1393	1,055	0,799	8620	1,476	0,253
1858	1,190	0,762			

Напряжение холостого хода при комнатной температуре $U_{xx} = 1{,}482$ В.



Вольт-амперная кривая той же серии (ток $I = U/R$). Площадь прямоугольника — мощность $P = UI$; наибольший прямоугольник — вблизи «колена» кривой; справа кривая упирается в $U_{xx} = 1{,}482$ В.



Зависимость $P(R)$; горизонтальная ось логарифмическая, чтобы был виден весь максимум. Максимум выражен отчётливо. Наибольшее измеренное

значение $P = 0{,}799$ мВт ($R = 1393$ Ом, $U = 1{,}055$ В); парабола по пяти точкам у вершины даёт $P_{\max} \approx 0{,}81$ мВт при $R \approx 1{,}3$ кОм. Кривая плавная, положение вершины определено с точностью около 2 %:

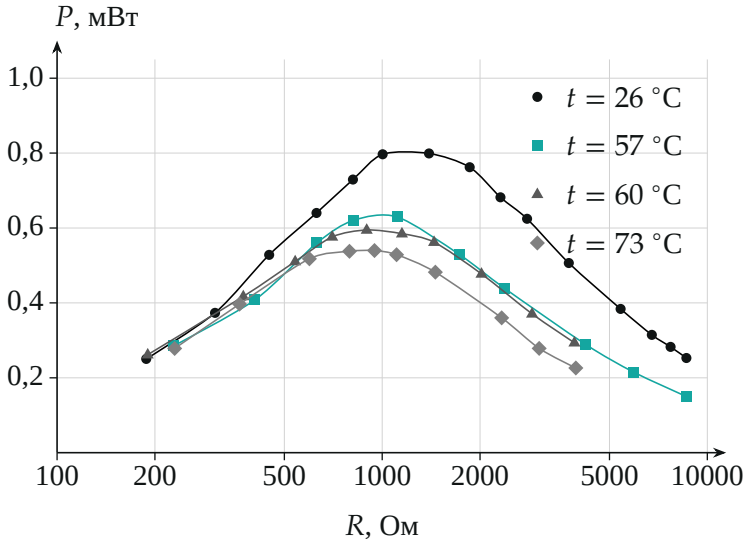
$$\boxed{P_{\max} = (0{,}80 \pm 0{,}02)\ \text{мВт}}$$

Разброс температуры за серию оцениваем по двум измерениям U_{xx} (в начале и в конце): они различаются на ≈ 20 мВ, что при угловом коэффициенте $U_{xx}(t)$ около $-9{,}3$ мВ/°C соответствует ≈ 2 °C.

Обратите внимание: порядок «выставить R — включить фонарик — измерить — выключить» не прихоть. Каждая секунда света греет СБ, и график $P(R)$ уже снимается при другой температуре.

Пункт 2. Максимальная мощность при разных температурах. Элемент Пельтье подключаем к выключенному источнику с регулятором на минимуме, затем включаем источник и ставим около 4 В; ждём 20 мин, пока U_{xx} перестанет меняться (признак равновесия температуры), и снимаем $P(R)$ как в п. 1. Повторяем при напряжении на элементе, большем примерно на 0,5 В, и ещё раз около 5 В. Каждый раз перед серией U_{xx} измеряем заново. Данные:

серия 2			серия 3			серия 4		
R	U	P	R	U	P	R	U	P
228	0,255	0,285	190	0,223	0,262	230	0,253	0,278
406	0,407	0,408	374	0,395	0,417	364	0,380	0,397
630	0,594	0,560	540	0,525	0,510	597	0,556	0,518
815	0,711	0,620	702	0,636	0,576	793	0,653	0,538
1113	0,837	0,629	896	0,730	0,595	947	0,715	0,540
1727	0,956	0,529	1150	0,820	0,585	1107	0,765	0,529
2380	1,022	0,439	1444	0,901	0,562	1457	0,838	0,482
4230	1,105	0,289	2020	0,982	0,477	2330	0,916	0,360
5930	1,130	0,215	2890	1,035	0,371	3040	0,920	0,278
8610	1,137	0,150	3900	1,070	0,294	3940	0,944	0,226

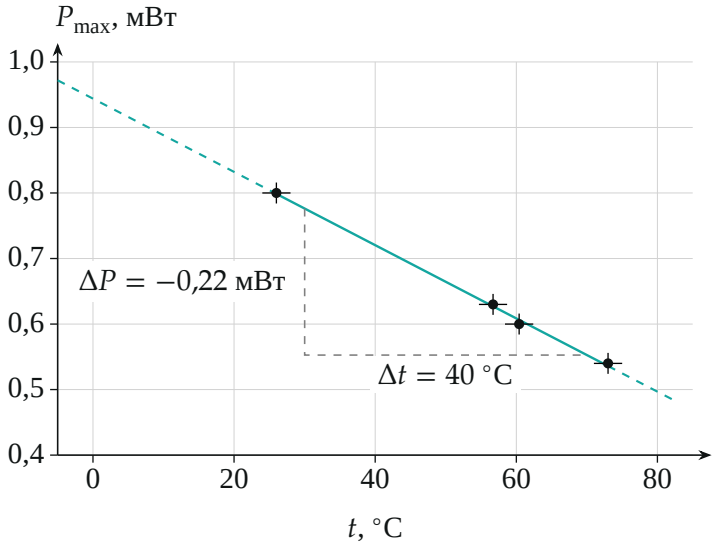


Те же серии: чем выше температура, тем ниже и несколько левее максимум. Температуру находим по U_{xx}, пользуясь линейностью: $t = t_0 + (U_{xx} - U_{xx,0})/\varkappa$, где $t_0 = 26\,^\circ\text{C}$ — комнатная температура, $\varkappa = \Delta U_{xx}/\Delta t$ — коэффициент, написанный на боксе установки. Его значения в тексте задачи нет; по температурам, принятым организаторами, он равен $\approx -9{,}3$ мВ/°C (три точки дают $-9{,}2 \ldots -9{,}4$). Итог:

серия	U_{xx}, В	t, °C	P_{max}, мВт	$R_{опт}$, кОм
1	1,482	26	0,80	1,3
2	1,198	57	0,63	1,0
3	1,164	60	0,60	1,0
4	1,047	73	0,54	0,85

P_{max} взято по максимуму таблицы и по параболе у вершины (они согласуются в пределах 2 %). Положение максимума $R_{опт}$ смещается лишь слегка — у вершины кривая пологая, поэтому $R_{опт}$ известно хуже (± 20 %), чем сама P_{max}.

Пункт 3. Угловой коэффициент. Строим $P_{max}(t)$; точки с погрешностями 2 % по мощности и 2 °C по температуре лежат вдоль прямой.



Прямая — МНК по четырём точкам (сплошная в диапазоне измерений, штриховая — продолжение, нужное для п. 4); усы — погрешности. МНК: $P_{max} = P_0 + k\,(t - 26\,^\circ\text{C})$, $P_0 = 0{,}80$ мВт,

$$\boxed{k = \frac{\Delta P_{max}}{\Delta t} = (-5{,}6 \pm 0{,}4)\ \text{мкВт}/^\circ\text{C}} \qquad (\text{около } -0{,}7\,\% \text{ на градус}).$$

Проверка вторым способом по крайним точкам: $(0{,}54 - 0{,}80)/(73 - 26) = -5{,}5$ мкВт/°C — то же в пределах погрешности.

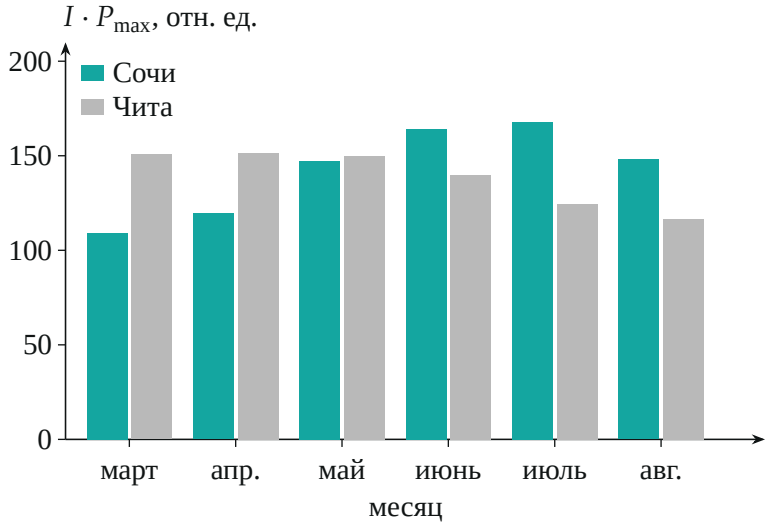
Пункт 4. Сочи и Чита. Батареи одинаковы, значит P_0 и k одни. Месячная выработка пропорциональна произведению инсоляции I_i на P_{max} при средней температуре месяца t_i (по линейной зависимости): $P_{max}(t_i) = P_0 + k\,(t_i - 26)$; за март–август энергия пропорциональна

$$S = \sum_{i=3}^{8} I_i\, P_{max}(t_i).$$

Расчёт (температуры месяцев — из таблицы условия):

	Сочи			Чита		
	t, °C	P_{max}, мВт	$I\,P_{max}$	t, °C	P_{max}, мВт	$I\,P_{max}$
Март	11,0	0,884	109,3	−1,0	0,951	150,7
Апрель	14,9	0,862	119,5	5,5	0,915	151,5
Май	20,2	0,832	147,1	14,6	0,864	150,0
Июнь	25,0	0,806	164,1	21,1	0,827	140,0
Июль	27,8	0,790	168,0	24,3	0,810	124,6
Август	28,8	0,784	148,0	20,7	0,830	116,7
сумма S			856,0			833,5

$$\frac{S_{\text{Сочи}}}{S_{\text{Чита}}} = \frac{856{,}0}{833{,}5} = 1{,}03, \qquad \frac{I_{\text{Сочи}}}{I_{\text{Чита}}} = \frac{1044{,}0}{961{,}5} = 1{,}09.$$



Вклад каждого месяца $I \cdot P_{max}$: в Сочи инсоляция выше летом, в Чите — весной, но Сочи жарче. Отношение выработки 1,03 почти равно единице, хотя инсоляция в Сочи больше на 9 %: тепло съедает преимущество. Это видно и на средних мощностях: $\overline{P}_{\text{Сочи}} = S/\sum I = 0{,}82$ мВт, $\overline{P}_{\text{Чита}} = 0{,}87$ мВт — батарея в Чите работает на $\approx 5\,\%$ эффективнее,

$1{,}09 \cdot 0{,}82/0{,}87 = 1{,}03$. Формальная погрешность отношения от k и P_0 меньше 1 % (P_0 при делении сокращается); основная неопределённость — в линейности зависимости вне измеренного диапазона 26–73 °C (март в Чите — −1 °C) и в других факторах, поэтому оцениваем ≈ 10 %:

$$\boxed{\frac{S_{\text{Сочи}}}{S_{\text{Чита}}} = 1{,}03 \pm 0{,}10}$$

Отношение 1,03 и отношение инсоляций 1,09 в пределах погрешности одинаковы.

Обратите внимание: «оптимально используемая» СБ — это учёт инсоляции на оптимально наклонённую площадку (так в таблице), поэтому энергия пропорциональна именно инсоляции из таблицы, а не широте города.

Проверка. Размерность: $U^2/R = \text{В}^2/\text{Ом} = \text{Вт}$; мощность в мВт получаем при U в вольтах и R в килоомах. Предел: $P \to 0$ при $R \to 0$ и $R \to \infty$, максимум между ними — в эксперименте $P = 0{,}25$ мВт при 0,19 кОм, 0,80 в максимуме, 0,25 при 8,6 кОм. Знак $k < 0$ согласуется с тем, что $U_{\text{хх}}$ падает с температурой. Второй способ для $S_{\text{Сочи}}/S_{\text{Чита}}$ — разложение на отношение инсоляций и средних мощностей — дал то же 1,03.

Ответ. 1) $P_{\max} = (0{,}80 \pm 0{,}02)$ мВт при $R \approx 1{,}3$ кОм, $U_{\text{хх}} = 1{,}482$ В; 2) $P_{\max}(t)$: 0,80 (26 °C), 0,63 (57 °C), 0,60 (60 °C), 0,54 мВт (73 °C); 3) $\Delta P_{\max}/\Delta t = (-5{,}6 \pm 0{,}4)$ мкВт/°C; 4) $S_{\text{Сочи}}/S_{\text{Чита}} \approx 1{,}03$ при отношении инсоляций 1,09 — в пределах погрешности (порядка 10 %) одинаковы.