

## Ракурс

Страница будущих «Платонов  
и быстрых разумом Невтонов»

Foreshortening / Sichtwinkel

A Page for the Future 'Platos and Quick Thinking Newtons' (M.V. Lomonosov) /  
Die Seite der zukünftigen "Platons und schnell denkenden Newtons" (M.W. Lomonossov)

УДК 520.8:523.9

DOI: 10.24411/2227-9490-2018-12031



В.В. Белков



П.С. Васильева



Н.Е. Кондратьев



Д.К. Кушнарев

**Белков В.В.** <sup>\*</sup>,  
**Васильева П.С.** <sup>\*\*</sup>,  
**Кондратьев Н.К.** <sup>\*\*\*</sup>,  
**Кушнарев Д.К.** <sup>\*\*\*\*</sup>,  
**Царькова О.Г.** <sup>\*\*\*\*\*</sup>,  
**Андреев С.Н.** <sup>\*\*\*\*\*</sup>



О.Г. Царькова



С.Н. Андреев

## Тепловой диаметр Солнца

\*Белков Валерий Владимирович, ученик ГБОУ Школа № 2007 ФМШ, Москва

**ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0002-5386-9733>

E-mail: valery-v-belkov@j-spacetime.com; belkovval@gmail.com

\*\*Васильева Полина Сергеевна, ученица ГБОУ Школа № 2007 ФМШ, Москва

**ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0002-9429-7495>

E-mail: polina-s-vasileva@j-spacetime.com; vasilevapolina@yandex.ru

\*\*\*Кондратьев Николай Евгеньевич, ученик ГБОУ Школа № 2007 ФМШ, Москва

**ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0002-6123-0761>

E-mail: nikolay-e-kondratyev@j-spacetime.com

\*\*\*\*Кушнарев Даниил Константинович, ученик ГБОУ Школа № 2007 ФМШ, Москва

**ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0001-8613-4760>

E-mail: daniil-k-kushnarev@j-spacetime.com

\*\*\*\*\*Царькова Ольга Германовна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, социальный педагог ГБОУ Школа № 2007 ФМШ, Москва

**ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0003-0158-8152>

E-mail: olga-g-tsarkova@j-spacetime.com; erudity-butova@mail.ru

\*\*\*\*\*Андреев Степан Николаевич, доктор физико-математических наук, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

**ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0003-3588-2894>

E-mail: stepan-n-andreev@j-spacetime.com; andreev\_stepan@mail.ru ✉

Экспериментально определен угловой диаметр Солнца по тепловому излучению (тепловой диаметр), которое регистрировалось при помощи измерительной схемы на базе моста Уитстона, один из резисторов которого был помещен в фокус телескопа-рефлектора. Показано, что тепловой диаметр Солнца не менее, чем на 12 % больше известного из литературы значения видимого диаметра Солнца.

**Ключевые слова:** Солнце; мост Уитстона; термодатчик; телескоп рефлектор; солнечная корона; угловой диаметр Солнца.

### Введение

Солнце — самое заметное из всех небесных тел — все еще хранит множество загадок. Возможно, результаты нашего исследования когда-нибудь послужат для решения одной из них. Идея нашего проекта состоит в том, чтобы измерить угловой размер Солнца на небе не в видимом свете, а в тепловом излучении, и сравнить его с размером видимым. Так как Солнце — газовый шар, четкой поверхности не имеющий, размеры

Белков В.В., Васильева П.С., Кондратьев Н.Е., Кушнарв Д.К., Царькова О.Г., Андреев С.Н. ТЕПЛОВОЙ ДИАМЕТР СОЛНЦА

Солнца зависят от того, каким способом мы их считаем; по этой причине допустимо назвать полученный результат «тепловым размером Солнца» в отличие от видимого. Однако для того, чтобы об этом говорить, сперва нужно вспомнить данные, известные на сегодняшний день, о строении Солнца, от самого ядра и до короны (см. табл. 1).

Таблица 1

Характеристики зон Солнца

Зона Солнца	Температура, К	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Ядро	$>1,4 \times 10^7$ (в центре)	$\sim 150$ [Basu et al. 2009]
Зона лучистого переноса (зона излучения)	$(7 \div 2) \times 10^6$	от 20 до 0,2 [Hathaway 2016]
Зона конвекции	от $2 \times 10^6$ до 5700	$2 \times 10^{-7}$ (на внешней границе) [Hathaway 2016]
Фотосфера	от 6600 до 4400	$10^{-8} - 10^{-9}$
Хромосфера	от 4000 до 30 000 [Williams 2018]	$10^{-9} - 10^{-12}$
Корона	от $(1 \div 2) \times 10^6$ (у нижней границы) до $2 \times 10^7$ макс. [Erdelyi, Ballai 2007] $10^5$ у орбиты Земли [Хромова 1994]	$< 10^{-12}$ (у поверхности) $10^{-19}$ на расстоянии $3R_c$

В центре Солнца находится ядро, где плотность и температура максимальны. В ядре происходят ядерные реакции, в результате чего выделяется энергия, которая в дальнейшем и становится солнечным светом. Вокруг ядра расположена зона лучистого переноса, температура в которой ниже, но все еще исчисляется миллионами градусов. При таких высоких температурах тепловая энергия в основном передается с помощью излучения, поэтому, фактически, в этих слоях движутся только фотоны, но не частички вещества. Вещество в этой области достаточно непрозрачно, длина свободного пробега фотонов мала из-за их рассеяния при взаимодействии с плотно расположенными электронами и другими частицами. Таким образом, путь фотона во многом случаен, и потому долог. Точные цифры, разумеется, неизвестны, но, по приближенным расчетам длина свободного пробега фотонов оказывается порядка 1 мм, а времени на перемещение фотона из центра Солнца до его края уходит от 10 до 170 тысяч лет [Акопян 2017; Mitalas, Sills 1992; Young 2007].

Далее расположена зона конвекции, в которой температура уже не так высока и которая характеризуется началом конвективных процессов – перемешиванию солнечного вещества, когда оно горячее всплывает наверх, а, остыв, опускается обратно. Скорость такого перемешивания растет с высотой, достигая на внешних границах области в среднем 1–2 км/с [Физика космоса... 1986; Mullan 2000, p. 22]. Еще дальше от ядра лежит фотосфера — собственно, видимая поверхность Солнца, относительно тонкая оболочка. Поверхность фотосферы покрыта сеткой гранул, которыми и кончается конвективный цикл: в центре гранул вещество из недр Солнца поднимается наружу, а между гранулами опускается. Гранулы крайне недолговечны, их срок жизни измеряется минутами. Также в фотосфере находятся знаменитые солнечные пятна, самые холодные места на Солнце, температура здесь опускается вплоть до 4000 К.

Несмотря на то, что Солнце, как уже говорилось, — газовый шар, не имеющий четких границ, мы воспринимаем солнечный диск резко очерченным, и связано это с тем, что фотосфера непрозрачна для собственного же света, в отличие от последующих слоев; поэтому львиная доля света Солнца исходит именно отсюда [Поверхность и атмосфера Солнца... Интернет-ресурс б/д].

Хромосфера — следующая за фотосферой оболочка. Она тоже светится, хотя слабее, чем фотосфера, и в основном в красном диапазоне; это свечение можно наблюдать во время солнечного затмения, когда фотосфера скрыта за Луной. Помимо этого, температура хромосферы растет с высотой. Считается, что это происходит из-за разогрева приходящими снизу волнами и магнитными полями.

И, наконец, корона. Она примечательна своей необычайной протяженностью и постепенно переходит в солнечный ветер, частицы которого можно обнаружить почти повсюду в Солнечной Системе. Ее структура необычна: в короне присутствуют корональные дыры (разреженные холодные области), а также петли и лучи более плотного газа, хорошо видимые на рис. 1 [Emspak 2015].

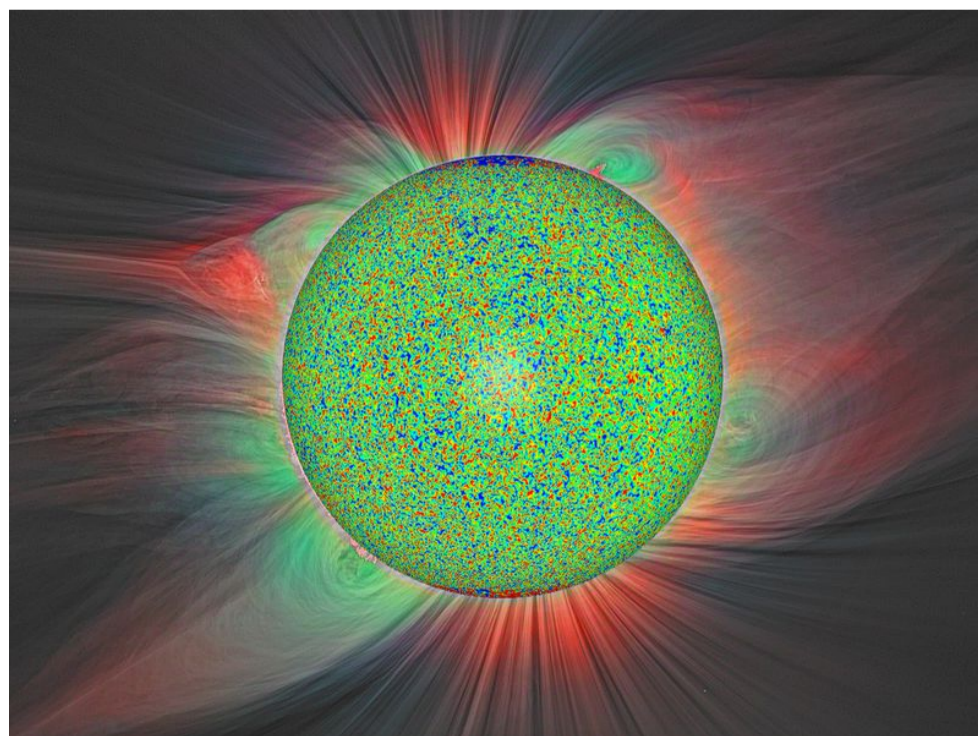


Рис. 1. Мозаичное изображение показывает магнитную активность на солнечном диске, который окружен относительно слабой короной. (Тахар Амари / Центр физической физики. Политехническая школа ЦНРС. ФРАНЦИЯ и Эклипс С. Хаббал и М. ДракМюллер — Tahar Amari / Centre de physique théorique. CNRS-Ecole Polytechnique. FRANCE & Eclipse S. Habbal and M. DruckMuller) [Emspak 2015].

Форма короны меняется со временем в соответствии с 11-летним циклом солнечной активности, становясь более гладкой, вытянутой по экватору и однородной в минимумы и округлой, лучистой, но при этом чуть менее яркой в максимумы.

Белков В.В., Васильева П.С., Кондратьев Н.Е., Кушнарв Д.К., Царькова О.Г., Андреев С.Н. ТЕПЛОВОЙ ДИАМЕТР СОЛНЦА

Основная загадка короны — ее огромная температура в один-два миллиона градусов, которая, как и плотность, к тому же еще и крайне медленно снижается с высотой. Только лишь излучения, исходящего снизу, от Солнца, скорее всего, недостаточно для поддержания столь высокой температуры. Проблема нагрева солнечной короны до сих пор остается нерешенной, хотя на этот счет существует множество различных предположений [Пасачофф 2017].

Корона, как и хромосфера, слабо светится. (Плотность вещества в короне крайне мала, потому она и дает довольно слабое излучение даже при столь высокой температуре). Хотя корону прекрасно видно при солнечном затмении, для наблюдения короны в другое время существует специальный прибор — коронограф, изобретенный французским экспериментатором Бернаром Лио в 1931 году. Этот прибор закрывает солнечный диск «искусственной Луной»; однако даже с этим диском свет Солнца все равно слегка рассеивается в телескопе и создает засвечивающий корону ореол, для устранения которого используются дополнительные приспособления.

Что касается темы проекта, то, как было сказано ранее, внешние слои атмосферы Солнца испускают видимый свет довольно слабо. Однако тепловое излучение они могут испускать с другой интенсивностью. Иначе говоря, когда мы смотрим на небо, мы видим Солнце в таком угловом размере, в каком оно испускает видимый свет, и считаем это угловым размером Солнца, на основании которого затем можем посчитать диаметр; но если вместо света мы используем тепловое излучение, полученный нами диаметр может оказаться другим.

Таким образом, целью нашего исследования является измерение теплового диаметра Солнца, а гипотеза состоит в том, что тепловой диаметр больше видимого. В ходе проведения намеченных работ необходимо решить следующие задачи:

1. разработать методику измерения,
2. обосновать корректность измерений,
3. собрать измерительную систему и съюстировать прибор,
4. снять и обработать данные,
5. проанализировать полученные данные и верифицировать (проверить) гипотезу.

#### Методика проведения эксперимента

Идея эксперимента предполагает сканирование телескопом небесной сферы. Возможны два варианта сканирования: активное и пассивное. Активное сканирование предполагает оснащение сервоприводом азимутальной или экваториальной монтировки телескопа. Пассивное сканирование достигается за счет естественного вращения небесной сферы и не требует применения следящего привода. Фиксация оптической оси в выбранном направлении позволяет просканировать полосу небесной сферы шириной, равной угловому полю зрения телескопа. Задача сканирования заданной полосы состоит из двух частей: первичная ориентация оси и заданное смещение.

В данной работе используется метод ручного позиционирования направленности телескопа, при этом производится первичная ориентация телескопа на Солнце и последующий поворот телескопа на угол, соответствующий углу поворота небесной сферы за 5 минут. Для целей последующего анализа получаемых данных происходящие «события» заносятся в журнал эксперимента. Первичная ориентация телескопа на Солнце контролируется визуально.

После выполнения ориентации телескопа на светило производится ручной поворот корпуса телескопа по азимуту и высоте на углы, соответствующие 5-минутному повороту небесной сферы, контролируемый по шкалам на азимутальной монтировке телескопа. Углы поворота по азимуту и высоте предварительно вычисляются с помощью астрономического онлайн-калькулятора.

#### Схема эксперимента

Основной элемент, использованный в наших экспериментах, — телескоп-рефлектор (рис. 2).

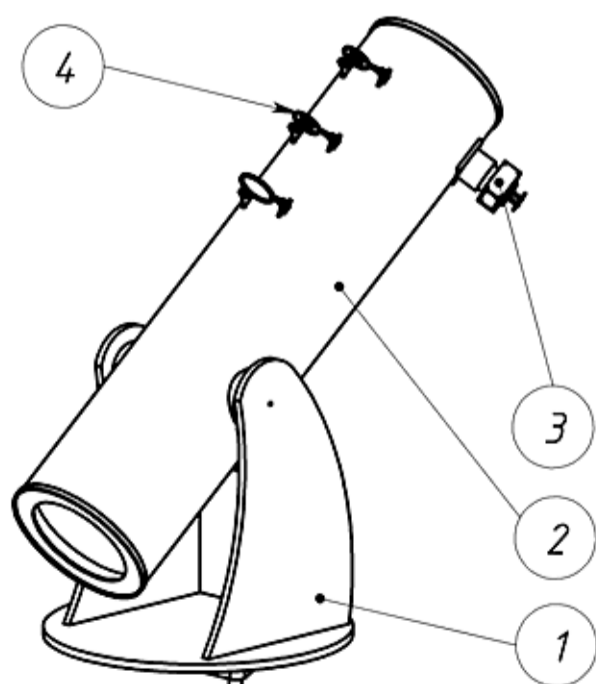


Рис. 2. Телескоп-рефлектор:  
1 — монтировка телескопа; 2 — труба телескопа; 3 — головка измерительная; 4 — прицел теневой.  
Фото авторов

Попадая в объектив телескопа, солнечные лучи отражаются от параболического зеркала и с помощью плоского зеркала меньшего размера направляются на измерительную головку (рис. 3). В фокусной плоскости внутри измерительной головки расположены два сенсорных резистора, нагреваемых солнечным излучением (рис. 4).

Белков В.В., Васильева П.С., Кондратьев Н.Е., Кушнарв Д.К., Царькова О.Г., Андреев С.Н. ТЕПЛОВОЙ ДИАМЕТР СОЛНЦА



Рис. 3. Считывающая головка прикреплена к телескопу.  
Фото авторов

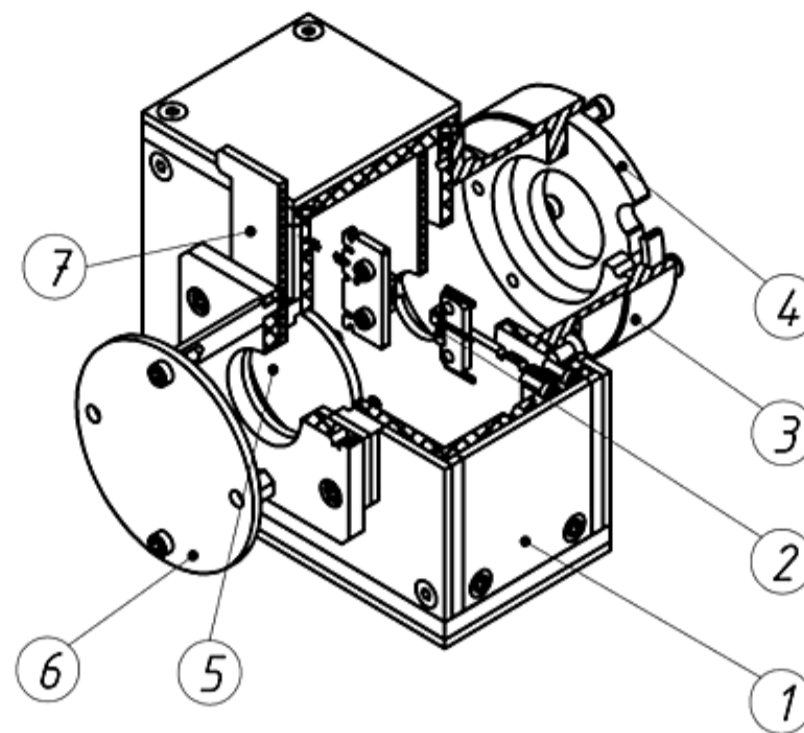
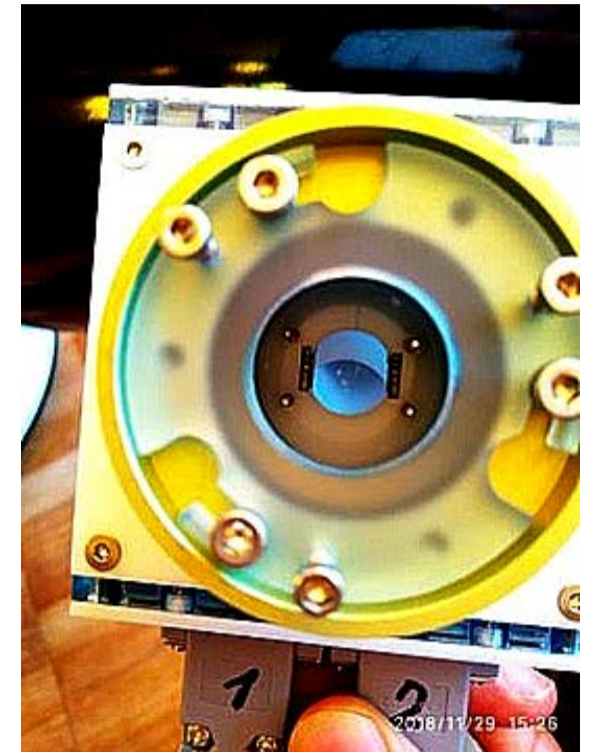


Рис. 4. Измерительная головка:  
1 — корпус головки измерительной; 2 — крепление сенсоров; 3 — тубус присоединительный; 4 — диафрагма сменная; 5 — окуляр; 6 — экран; 7 — шторка окуляра.  
Фото авторов



К тыльной стороне сенсорных резисторов подключены датчики температуры, которые, в свою очередь, подключены к устройству контроля температуры (рис. 5). Сенсорные резисторы измерительной головки соединены в мосты Уитстона. Также в измерительной головке находятся два вольтметра, подключенные к мостам Уитстона (рис. 5). Остальные резисторы мостов помещались внутри собственного термостатичного кожуха, отнесенного от сенсорной головки на расстояние около 1 м. Измерительные приборы были соединены между собой кабелями с заземленными экранами.

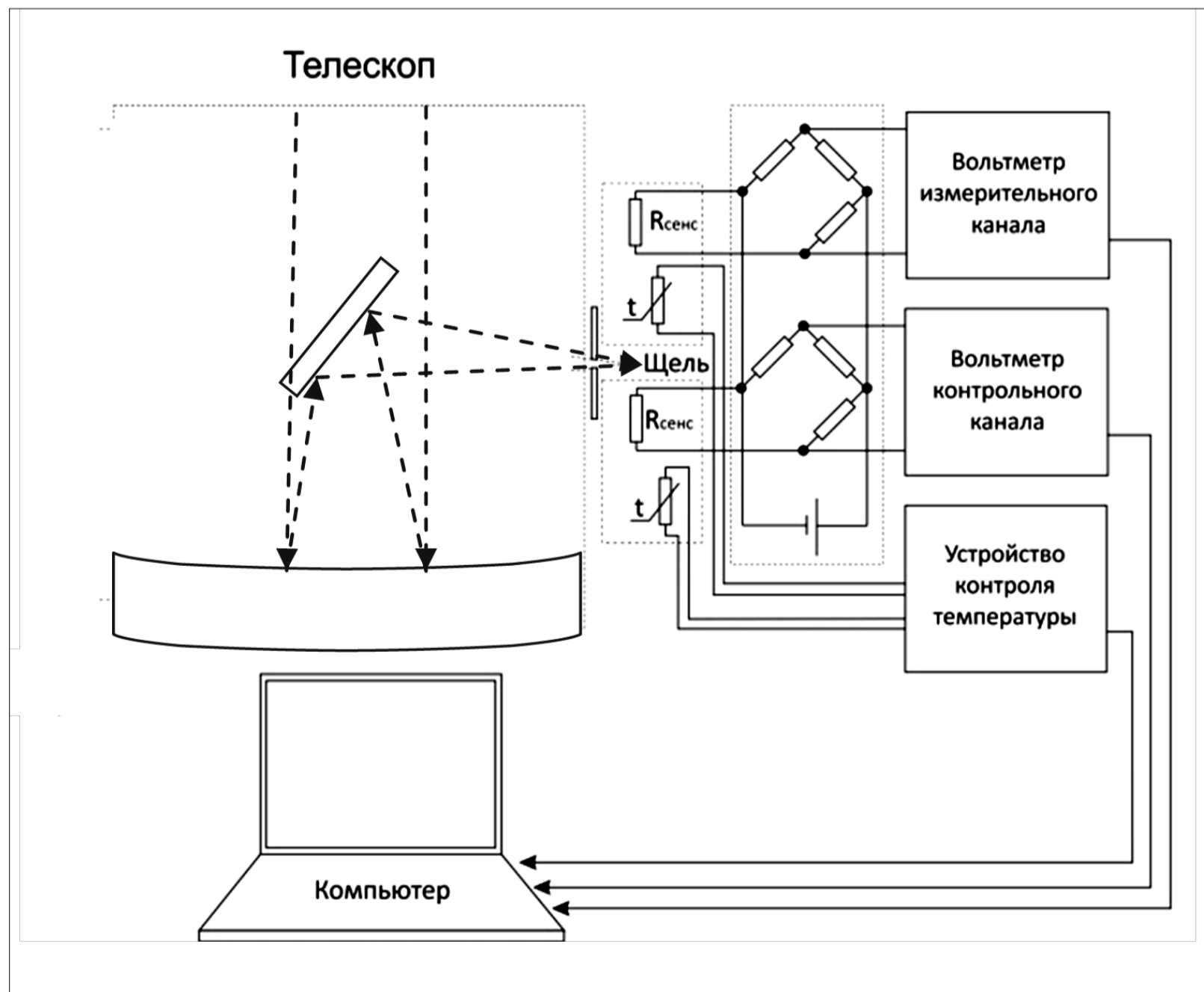


Рис. 5. Принципиальная схема измерений

Через 4-канальное АЦП (аналого-цифровой преобразователь — устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в дискретный код (цифровой сигнал)) данные выводятся на компьютер. Разбалансировка моста Уитстона регистрировалась с помощью двух цифровых милливольтметров АМЕ-1102, которые были связаны с компьютером через USB интерфейс. Термосопротивления подключались к двухканальному контроллеру температуры DX5100, связанному с компьютером через интерфейс RS-485.

С помощью специально разработанного программного обеспечения полученные из каждого канала величины напряжения разбаланси-

Белков В.В., Васильева П.С., Кондратьев Н.Е., Кушнарв Д.К., Царькова О.Г., Андреев С.Н. ТЕПЛОВОЙ ДИАМЕТР СОЛНЦА

ровки и температуры записывались синхронно в один массив (рис. 6). После компьютерной программной обработки получаем: показания температур двух температурных датчиков, расположенных с тыльной стороны сенсорных резисторов, и показания двух вольтметров контрольных каналов с рассчитанными погрешностями в зависимости от времени.

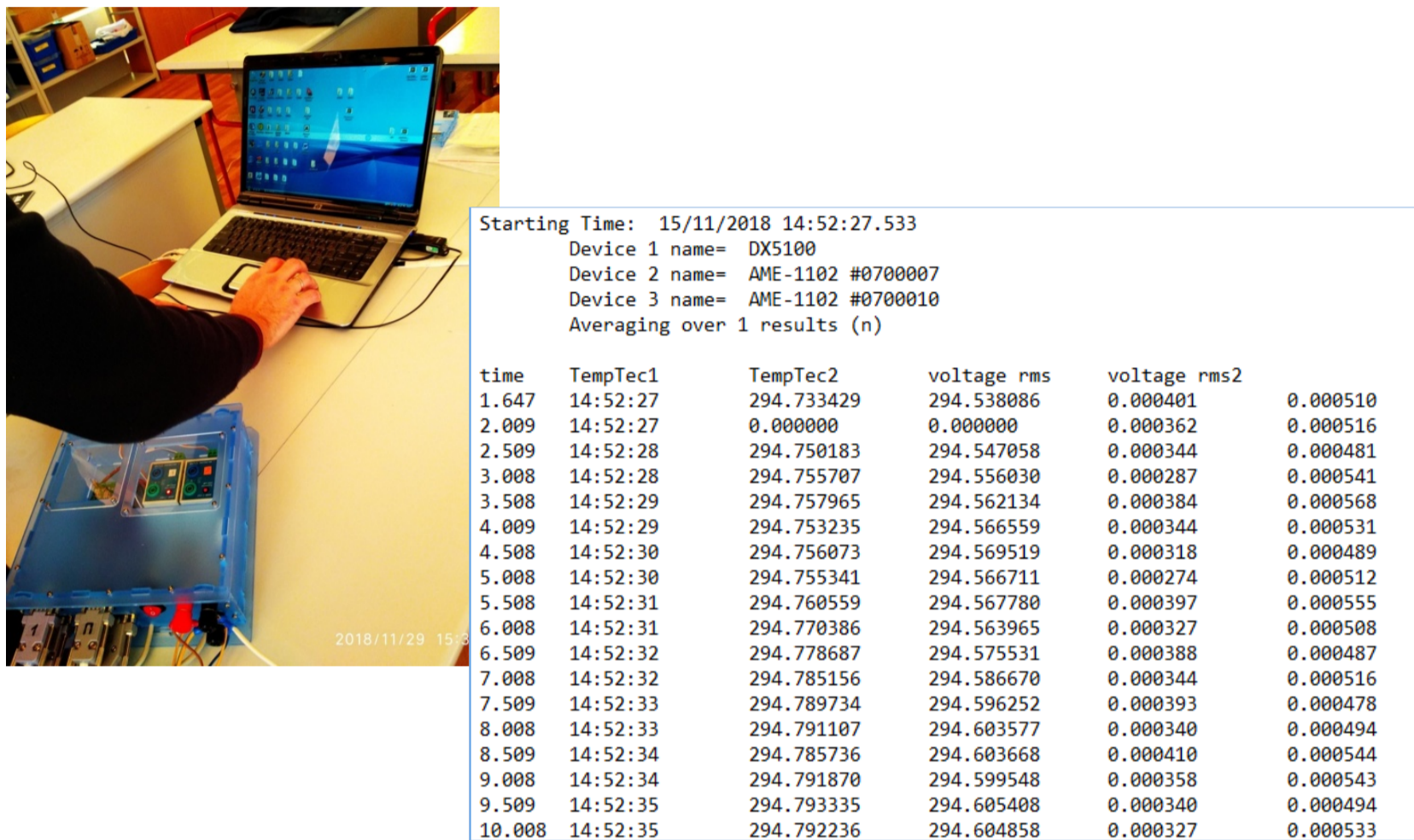


Рис. 6. Регистрация данных эксперимента. Фото авторов

Таким образом, в эксперименте сбор данных по тепловому воздействию излучения Солнца на измерительную систему происходит одновременно по четырем каналам с временным разрешением 5 мс. По каждому 100 измерениям каждой величины находят ее среднее значение и погрешность, которые заносятся в итоговый data file одной строчкой, включающей время записи файла, астрономическое время, температуры первого и второго термодатчиков, показания первого и второго вольтметра, погрешности вольтметров.

По полученным данным строились графики зависимости напряжения разбалансировки моста и текущей температуры сенсорных резисторов от времени. При этом погрешность измерения напряжения разбалансировки составляла <1 мВ, а точность измерения температуры — 0,01 К.

**Порядок выполнения эксперимента**

1. Выписать текущие эфемериды Солнца, пользуясь данными астрономического календаря. Занести величины значений азимутальных координат в таблицу для 5-минутных интервалов на дату и время наблюдений. Вычислить и занести в таблицу величину разницы по азимуту и высоте для 5-минутного сдвига телескопа вперед по движению Солнца вдоль эклиптики (рис. 7).

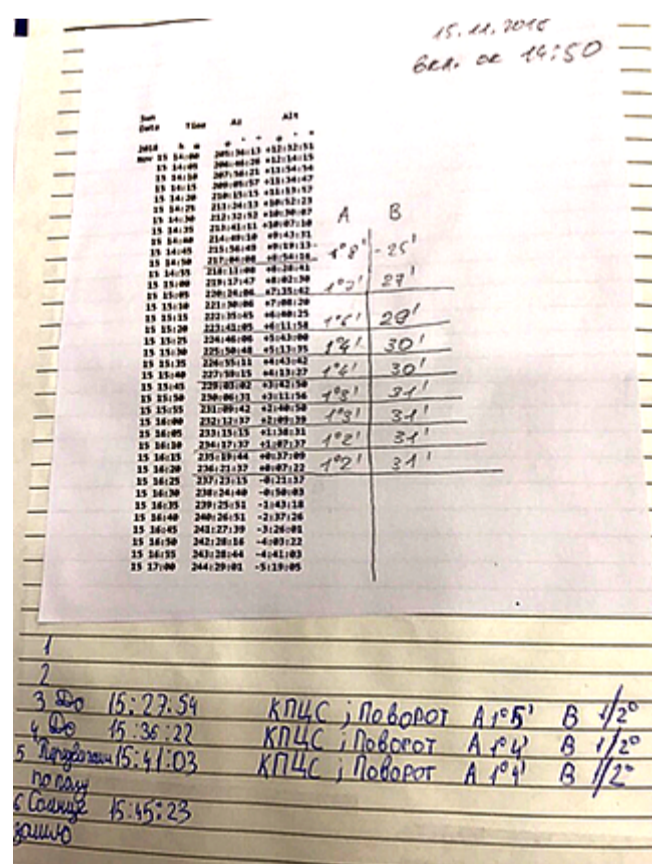


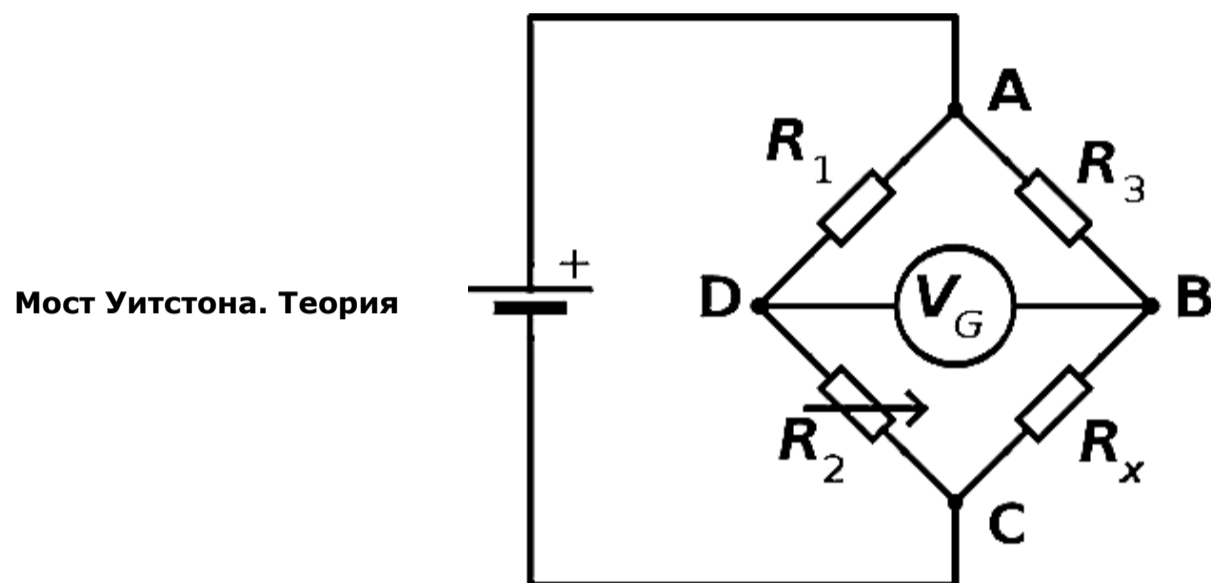
Рис. 7. Азимут и высота Солнца для конкретных даты и времени эксперимента. В таблицу занесены значения разницы по азимуту и высоте для 5-минутного сдвига телескопа вперед по движению Солнца вдоль эклиптики. Фото авторов.

2. Включить измерительный комплект приборов, запустить программу и убедиться в успешном начале записи данных. Активировать метку (Make Timestamp) в программе записи и отметить событие в журнале. Снять крышку и навести телескоп на Солнце, контролируя процесс по проекции светила на экран. Закрыть крышку телескопа. Активировать метку. Выставить подвижные указатели шкал на нулевые значения.

Белков В.В., Васильева П.С., Кондратьев Н.Е., Кушнарв Д.К., Царькова О.Г., Андреев С.Н. ТЕПЛОЙ ДИАМЕТР СОЛНЦА

3. Повернуть корпус телескопа по азимуту и высоте на вычисленные величины из таблицы. Активировать метку. Открыть крышку телескопа.
4. Подождать 12 минут, после чего произвести новый цикл записи, повторив пункты 4 и 5.
5. Остановить запись данных программой после выполнения запланированных циклов эксперимента.

Одним из элементов измерительной головки является мост Уитстона (рис. 8) [Хромова 1994; Мякишев и др. 2002; Кабардин и др. 1995].



Мост Уитстона. Теория

Рис. 8. Стандартное изображение моста Уитстона.

Рассмотрим вопрос о том, насколько измерения с использованием данной электрической схемы эксперимента могут быть корректны и выясним, как показания вольтметров измерительных каналов коррелируют с показаниями термодатчиков сенсорных резисторов.

Мост Уитстона — электрическая схема или устройство для измерения электрического сопротивления (рис. 8). Найдем падение напряжения на гальванометре. Схема для решения задачи показана рис. 9.

$$U_G = \varphi_2 - \varphi_1 = (\varphi - \varphi_1) - (\varphi - \varphi_2) = \left( U - \frac{UR}{R+r} \right) - \left( \frac{U}{2} \right)$$

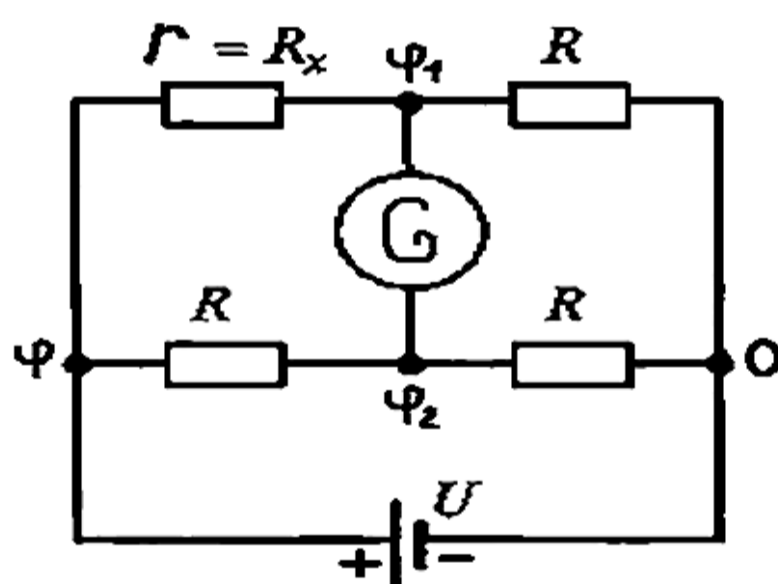


Рис. 9. Схема для решения задачи.

Таким образом, показания гальванометра зависят от изменяющегося при нагреве сопротивления сенсорного резистора  $r(T)$  следующим образом:

$$U_G = \frac{U}{2} \left( \frac{r-R}{r+R} \right)$$

### Зависимость сопротивления от температуры

Рассмотрим процесс, который происходит при попадании светового пучка на сенсорный резистор.

Солнечный свет взаимодействует с электронами металла, у электрона появляется кинетическая энергия. Он ее передает в узел кристаллической решетки, появляются колебания, колебания передаются другим узлам, идет нагревание металла. Сопротивление резистора растет с ростом температуры вследствие рассеяния электронов на фонах (тепловых колебаниях кристаллической решетки).

Известно [Хромова 1994; Мякишев и др. 2002; Кабардин и др. 1995], что удельное сопротивление проводника при изменении температуры от  $T_0$  до  $T$  выражается формулой

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha T);$$

где  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления, измеряемый в СИ в Кельвинах в минус первой степени ( $K^{-1}$ ). Сопротивление

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Примем, что  $\frac{l}{S} = const$ , тогда

$$r = R(1 + \alpha T).$$

Белков В.В., Васильева П.С., Кондратьев Н.Е., Кушнарв Д.К., Царькова О.Г., Андреев С.Н. ТЕПЛОЙ ДИАМЕТР СОЛНЦА

Подставим выражение для  $r$  в формулу  $U_G = \frac{U}{2} \left( \frac{r-R}{r+R} \right)$  и получим:

$$U_G = \frac{U}{2} \frac{\alpha T}{(\alpha T + 2)}$$

Температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  — величина, равная относительному изменению электрического сопротивления участка электрической цепи или удельного сопротивления вещества при изменении температуры на единицу [Хромова 1994; Мякишев и др. 2002; Кабардин и др. 1995]. Характеризует зависимость электрического сопротивления от температуры. Для проводников  $\alpha > 0$  и слабо изменяется с изменением температуры. В табл. 2 представлены значения температурного коэффициента сопротивления для некоторых металлов. Заметим, что  $\alpha$  достаточно мало.

Таблица 2

Удельное сопротивление  $\rho$  (при 20 °С) и температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  металлов и сплавов

Вещество	$\rho$ , $\times 10^{-8}$ Ом·м или $\times 10^{-2}$ Ом·мм <sup>2</sup> /м	$\alpha$ , К <sup>-1</sup>	Вещество	$\rho$ , $\times 10^{-8}$ Ом·м или $\times 10^{-2}$ Ом·мм <sup>2</sup> /м	$\alpha$ , К <sup>-1</sup>
Алюминий	2,8	0,0042	Нихром	110	0,0001
Вольфрам	5,5	0,0048	Свинец	21	0,0037
Латунь	7,1	0,001	Серебро	1,6	0,004
Медь	1,7	0,0043	Сталь	12	0,006
Никель	42	0,0001	Константан	50	0,00003

Максимальный рост температур сенсорных резисторов в наших экспериментах составлял около 100 градусов, то есть диапазон их температур — 300÷400 К (см. рис. 10). В мостах Уитстона нашей установки использовались металлоксидные пленочные резисторы типа С2.23 сопротивлением  $\approx 1$  кОм, номинальной мощностью 0,25 Вт и температурным коэффициентом сопротивления  $0,1 \cdot 10^{-3}$  (1/К).

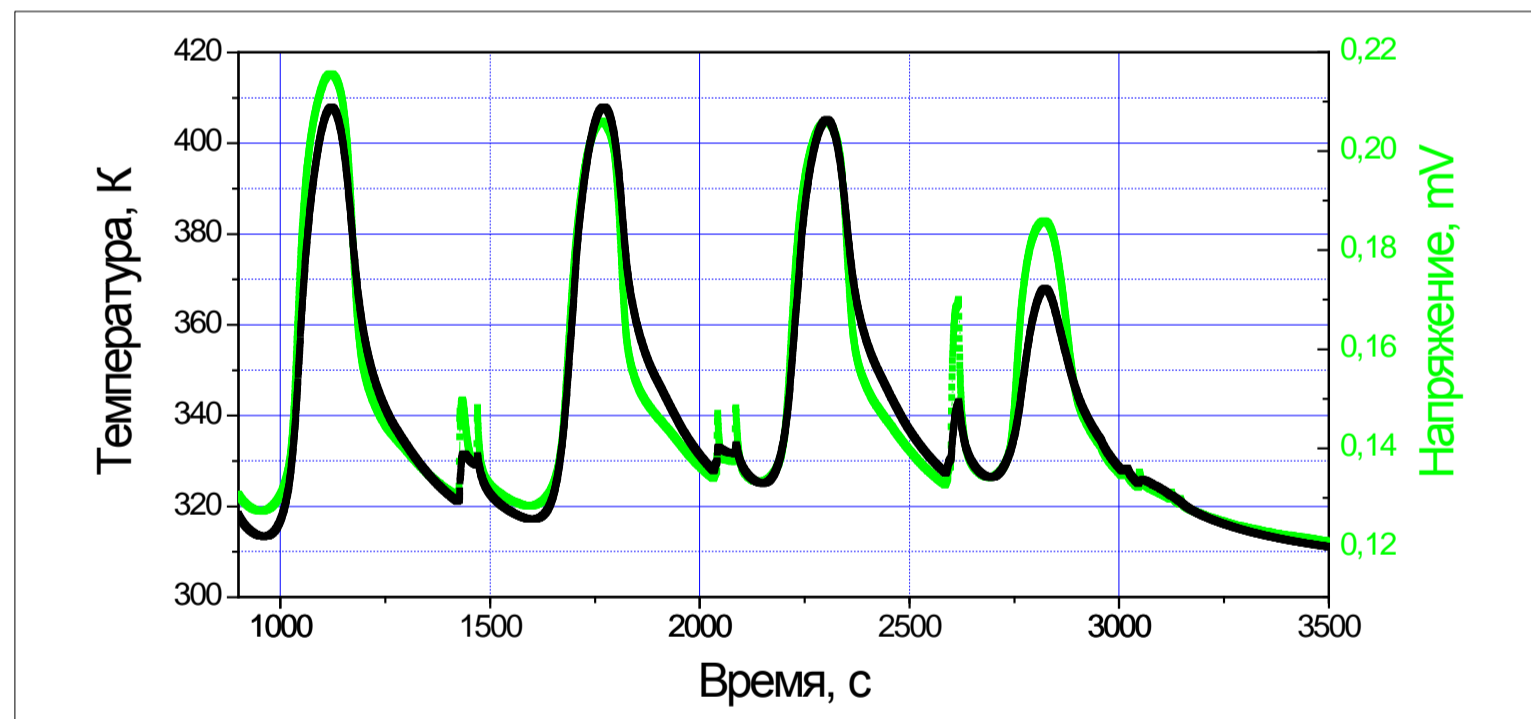


Рис. 10. Зависимости температуры от времени  $T(t)$  и напряжения от времени  $U(t)$  коррелируют друг с другом.

Таким образом,  $\alpha T \ll 1$ , поэтому в выведенной формуле зависимости напряжения от температуры

$$U_G = \frac{U}{2} \frac{\alpha T}{(\alpha T + 2)}$$

можно пренебречь данной величиной.

Тогда конечная формула будет выглядеть так:

$$U_G = \frac{U \alpha}{4} T.$$

Мы получили формулу зависимости напряжения от температуры для построенной нами модели. Зависимость линейная. Чем больше температура, тем больше напряжение.

#### Анализ экспериментальных данных

Полученные экспериментальные зависимости температуры от времени  $T(t)$  и напряжения от времени  $U(t)$  соответствуют 10-минутным циклам нагрева и охлаждения сенсорных резисторов при прохождении проекции Солнца по их поверхностям в пределах измерительной головки (рис. 10), а также сдвига телескопа для записи следующего цикла прохождения. Количество таких циклов, записанных с помощью аппаратуры, зависит от благоприятных условий визирования (например, отсутствием облачности) за время эксперимента. На графике рис. 10 таких циклов четыре. Затенение Солнца облаками приводит к уменьшению величины нагрева датчиков и, соответственно, амплитуды  $T(t)$  и  $U(t)$ .

Белков В.В., Васильева П.С., Кондратьев Н.Е., Кушнарев Д.К., Царькова О.Г., Андреев С.Н. ТЕПЛОВОЙ ДИАМЕТР СОЛНЦА

Несмотря на это, данные зависимости коррелируют друг с другом, что подтверждает предложенную модель пропорциональности измененных температуры и напряжения.

Теперь рассмотрим более подробно процедуру расчета искомого теплового диаметра Солнца (рис. 11).

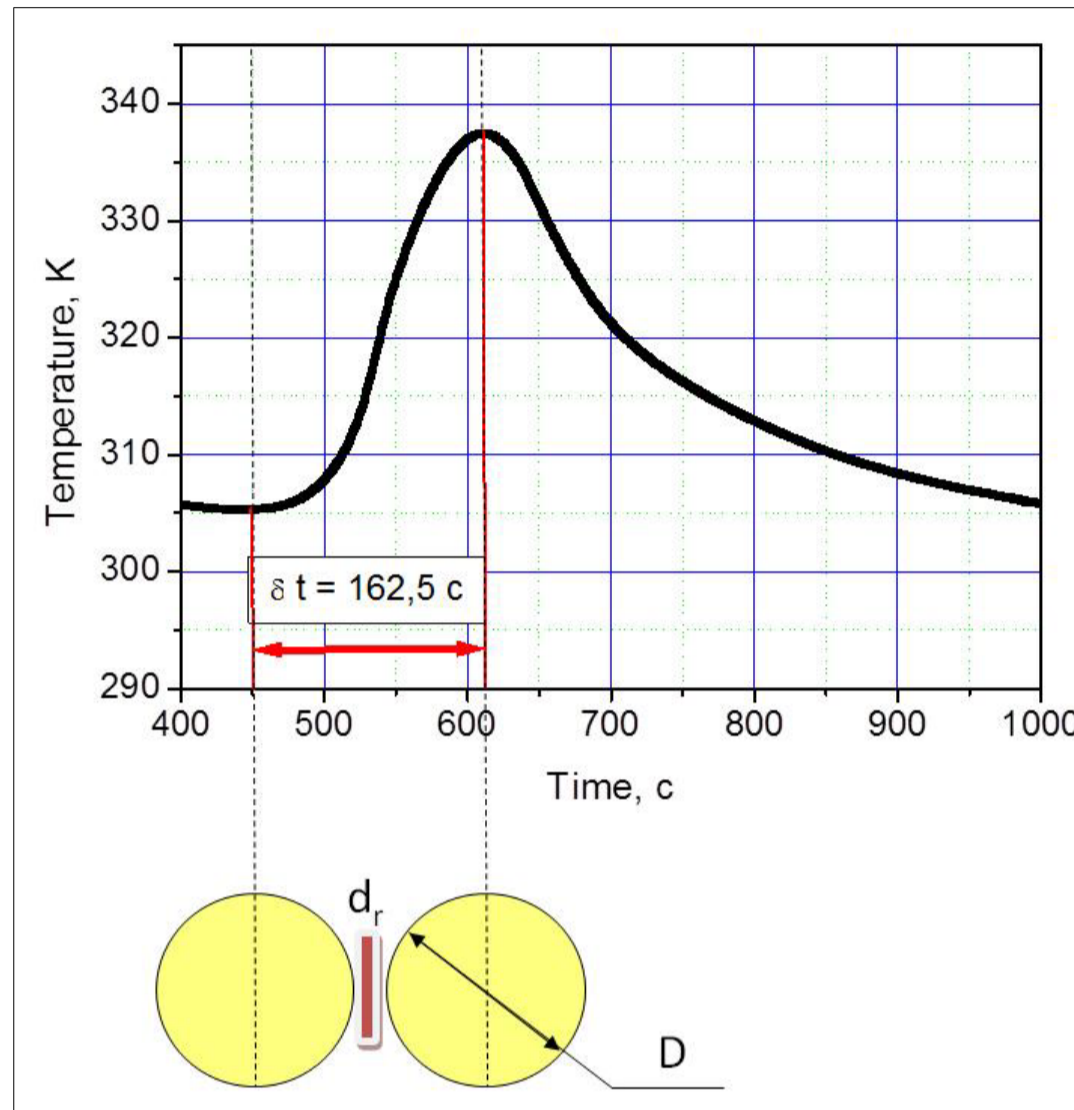


Рис. 11. Расчет теплового диаметра Солнца.

При начале прохождения изображения Солнца в фокусной плоскости телескопа (левая окружность) по поверхности одного из сенсорных резисторов (синяя точка между двумя окружностями), температура термодатчика начинает расти. Это соответствует росту зависимости  $T(t)$  на рис. 11. При завершении прохождения (правая окружность) температура достигает максимума и потом только падает из-за охлаждения резистора. Таким образом, угловой тепловой диаметр Солнца можно вычислить, зная время прохождения через резистор проекции диаметра Солнца  $\delta t$  и угловую скорость его передвижения по небосклону  $v$ :

$$v = \frac{360^\circ}{24 \text{ ч}} = \frac{15^\circ}{\text{ч}} = \frac{15''}{\text{с}},$$

тогда угловой тепловой диаметр Солнца  $D$  равен

$$D = v \cdot \delta t - d_r,$$

где  $d_r$  — размер резистора. По проведенным оценкам относительных размеров резистора и проекции Солнца в фокусной плоскости

$$d_r = 0,12 \cdot D,$$

тогда тепловой диаметр Солнца равен:

$$D = \frac{v \cdot \delta t}{1,12} = \frac{15''/\text{с} \cdot 162,5\text{с}}{1,12} = 2176'' = 36,3'$$

Учитывая, что во время проведения эксперимента величина видимого диаметра составляла  $D_v = 32,5'$  [Астрономический календарь... 2017], то разность между тепловым диаметром  $D$  и видимым  $D_v$  оказывается равна:

$$\left( \left( \frac{D}{D_v} \right) - 1 \right) \cdot 100\% = 12\%$$

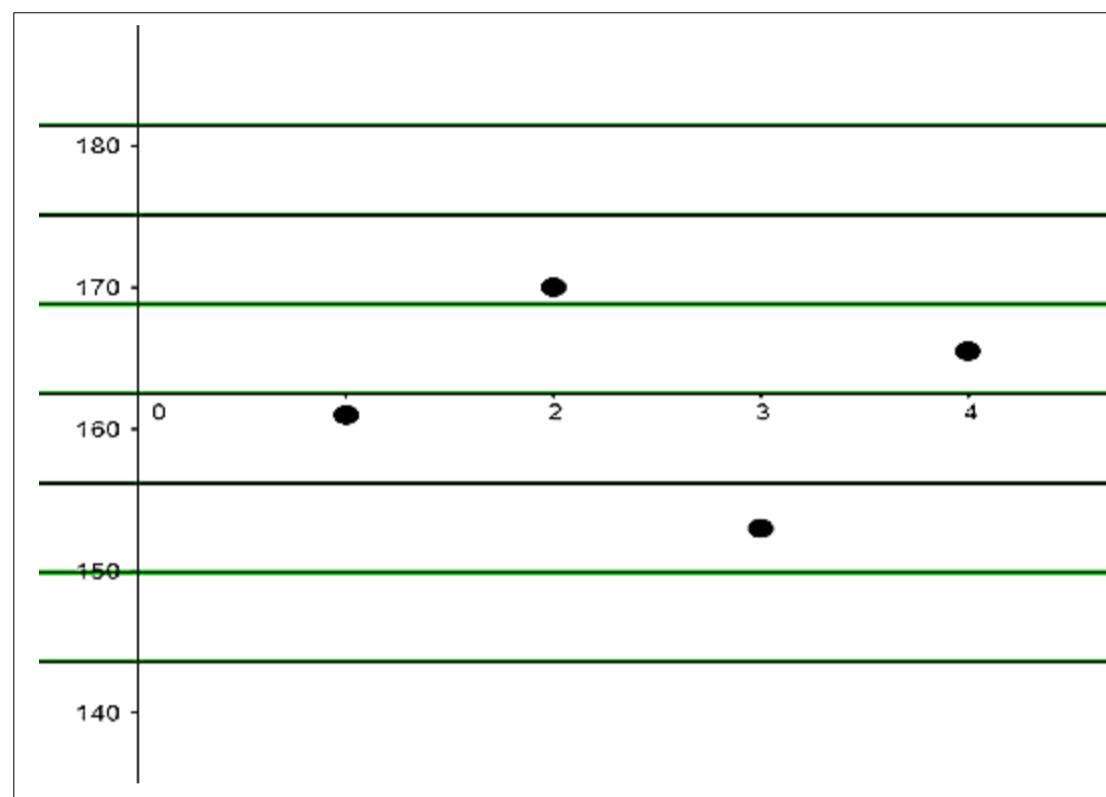
Таблица 3

Рассчитанные значения отношения теплового диаметра к видимому со средним квадратичным отклонением  $\sigma$

№	1	2	3	4	$\sigma$	STD
$\delta t$	161	170	153	165,5	6,3	162,5
$\frac{D}{D_v}$	1,11	1,17	1,05	1,14	0,049	1,12



Белков В.В., Васильева П.С., Кондратьев Н.Е., Кушнарев Д.К., Царькова О.Г., Андреев С.Н. ТЕПЛОВОЙ ДИАМЕТР СОЛНЦА



**Рис. 12.** Попадание рассчитанных значений  $\delta t$  на отрезки, равные среднеквадратическому отклонению  $\sigma$ .

Поскольку погрешность в измерения может вносить не только облачность, но и нарушение центровки прохождения по фокусной плоскости изображения Солнца, то измерения могут показать не диаметр, а хорду круга, что заведомо будет меньше диаметра. Поэтому можно заключить, что разность теплового и видимого диаметров вероятнее всего больше среднего измеренного.

Также стоит заметить, что практическое использование солнечной энергии с помощью, например, солнечного концентратора (**рис. 13**), конструктивно рассчитанного на видимый диаметр Солнца, может привести к ощутимым потерям его выходной мощности, поскольку тепловая площадь больше видимой

$$\left( \left( \frac{D}{D_v} \right)^2 - 1 \right)$$

уже примерно на 25%.



**Рис. 13.** Солнечный концентратор. Фото с сайта <https://solntsepek.ru/solnechnyj-kiptyatilnik/solnechnyj-koncentrator.html>.

### Заключение

В ходе исследований были решены следующие задачи:

- обоснована корректность разработанной методики измерений;
- собрана и съюстирована измерительная система;
- получены, обработаны и проанализированы экспериментальные данные;
- выведена формула линейной зависимости напряжения от температуры для построенной модели

( $U$  — напряжение питания,  $a$  — температурный коэффициент сопротивления);

- показано, что экспериментальные зависимости температуры от времени  $T(t)$  и напряжения от времени  $U_G(t)$  коррелируют друг с другом, что подтверждает предложенную модель;

Белков В.В., Васильева П.С., Кондратьев Н.Е., Кушнарв Д.К., Царькова О.Г., Андреев С.Н. ТЕПЛОЙ ДИАМЕТР СОЛНЦА

— впервые рассчитано, что тепловой диаметр Солнца больше видимого не менее, чем на 12%, что согласуется с гипотезой и означает, что тепловая площадь Солнца больше видимой на ~25%.

Таким образом, использование солнечной энергии с помощью устройств, конструктивно рассчитанных именно на тепловой диаметр Солнца, может привести к ощутимому увеличению их выходной мощности и КПД по сравнению с устройствами, рассчитанными на видимый диаметр Солнца.

В дальнейшей работе планируется: проанализировать влияние температур фотосферы и корональной области Солнца на нагрев термодатчиков при определении размера звезды указанным выше способом, провести серию экспериментов с использованием фильтров для выделения определенного спектрального диапазона, более мощных АЦП, термодатчиков другого типа; а также исследовать экспериментальную корреляцию напряжения мостов Уитстона и температуры датчиков в зависимости от их характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Акопян А. Блуждание фотона [Электронный ресурс] // Элементы. 2017. 5 авг. Режим доступа: [http://elementy.ru/problems/1546/Bluzhdanie\\_fotona](http://elementy.ru/problems/1546/Bluzhdanie_fotona).
2. Астрономический календарь на 2018 год. Справочное издание / Сост. А.Н. Козловский. М.: АстроКА, 2017. (Серия «Астро-библиотека». Вып. 14).
3. Кабардин О.Ф., Орлов В.А., Эвенчик Э.Е. Физика: Учеб. пособие для 10-го класса школы и классов с углубленным изучением физики / Под ред. А.А. Пинского. М.: Просвещение, 1995.
4. Мякишев Г.Я., Синяков А.З., Слободсков Б.А. Физика. Электродинамика. 10–11 класс: Учебник для углубленного изучения физики. М.: Дрофа, 2002.
5. Пасачофф Дж. Великое солнечное затмение 2017 года // В мире науки. 2017. № 10. С. 22–31.
6. Поверхность и атмосфера Солнца [Электронный ресурс] // Астрономия на пеньке. Режим доступа: [http://astrometric.sai.msu.ru/stump/html/1\\_112.html](http://astrometric.sai.msu.ru/stump/html/1_112.html).
7. Физика космоса: Маленькая энциклопедия / Под ред. Р.А. Сюняева. М.: Советская энциклопедия, 1986. С. 313–315.
8. Хромова Т.П. Солнечная корона // Физическая энциклопедия / Под ред. А.М. Прохорова. Т. 4. М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. С. 579–580.
9. Basu S., Chaplin W.J., Elsworth Y., New R., Serenelli A.M. "Fresh Insights on the Structure of the Solar Core." *Astrophys. J.* 699 (2009): 1403 – 1417. DOI: 10.1088/0004-637X/699/2/1403.
10. Emspak J. "A "Mangrove Forest" of Magnetism May Help Heat the Sun's Corona." *Smithsonian.com*. N.p., 10 Jun. 2015. Web. <[https://www.smithsonianmag.com/science-nature/mangrove-forest-magnetism-may-heat-suns-corona-180955556/?utm\\_source=smithsoniansciandnat&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=201506-science&spMailingID=22861896&spUserID=ODM4Njc3MTA5NjUS1&spJobID=581626209&spReportId=NTgxNjI2MjA5S0](https://www.smithsonianmag.com/science-nature/mangrove-forest-magnetism-may-heat-suns-corona-180955556/?utm_source=smithsoniansciandnat&utm_medium=email&utm_campaign=201506-science&spMailingID=22861896&spUserID=ODM4Njc3MTA5NjUS1&spJobID=581626209&spReportId=NTgxNjI2MjA5S0)>.
11. Erdelyi R., Ballai I. "Heating of the Solar and Stellar Coronae: A Review." *Astron. Nachr.* 328.8 (2007): 726–733. DOI: 10.1002/asna.20071080.
12. Hathaway D.H. "Solar Physics. Marshall Space Flight Center. The Solar Interior." *NASA Portal*. NASA, 1 Oct. 2015. Web. <<https://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml>>.
13. Mitalas R., Sills K.R. "On the Photon Diffusion Time Scale for the Sun." *Astrophys. J.* 401.2, pt. 1 (1992): 759–760.
14. Mullan D.J. "Solar Physics: From the Deep Interior to the Hot Corona." *From the Sun to the Great Attractor. Lecture Notes in Physics*. Eds. D. Page, and J.G. Hirsch. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. 1–47.
15. Williams D.R. "Sun Fact Sheet. Sun. Earth Comparison." *NASA Portal*. NASA, 23 Feb. 2018. Web. <<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>>.
16. Young A. "Living in the Atmosphere of the Sun. The 8-minute Travel Time to Earth by Sunlight Hides a Thousand-year Journey that Actually Began in the Core." *NASA Portal*. NASA, 2007. Web. <[https://sunearthday.nasa.gov/2007/locations/ttt\\_sunlight.php](https://sunearthday.nasa.gov/2007/locations/ttt_sunlight.php)>.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11—2011:

Белков, В. В., Васильева, П. С., Кондратьев, Н. Е., Кушнарв, Д. К., Царькова, О. Г., Андреев, С. Н. Тепловой диаметр Солнца [Электронный ресурс] / В.В. Белков, П.С. Васильева, Н.Е. Кондратьев, Д.К. Кушнарв, О.Г. Царькова, С.Н. Андреев // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. — 2018. — Т. 16. — Вып. 3–4. DOI: 10.24411/2227-9490-2018-12031. Стационарный сетевой адрес: 2227-9490e-aprov\_r\_e-ast16-3\_4.2018.31.

## THERMAL DIAMETER OF THE SUN

Valery V. Belkov, pupil at Physico-mathematics School no. 2007, Moscow

**ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0002-5386-9733>

E-mail: valery-v-belkov@j-spacetime.com; belkovval@gmail.com

Polina S. Vasileva, pupil at Physico-mathematics School no. 2007, Moscow

**ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0002-9429-7495>

E-mail: polina-s-vasileva@j-spacetime.com; vasilevapolina@yandex.ru

Nikolay E. Kondratyev, pupil at Physico-mathematics School no. 2007, Moscow

**ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0002-6123-0761>

E-mail: nikolay-e-kondratyev@j-spacetime.com

Daniil K. Kushnarev, pupil at Physico-mathematics School no. 2007, Moscow

**ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0001-8613-4760>

E-mail: daniil-k-kushnarev@j-spacetime.com

Olga G. Tsarkova, Ph.D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher at A.M. Prokhorov General Physics Institute of RAS, counsellor at Physico-mathematics School no. 2007, Moscow

**ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0003-0158-8152>

E-mail: olga-g-tsarkova@j-spacetime.com; erudity-butova@mail.ru

Stepan N. Andreev, Doctor of Physics, A.M. Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow

**ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0003-3588-2894>

E-mail: stepan-n-andreev@j-spacetime.com; andreev\_stepan@mail.ru ✉

The Sun still holds many secrets. Widely known in astronomical reference books its visible diameter is determined by the edges of the photosphere. Meanwhile, the temperature of the subsequent layers—the chromosphere and corona, reach millions of degrees Kelvin, despite its low density. The question of the influence of the strongly heated atmosphere of the sun on its thermal image on the receiver (for example, a solar concentrator) remained open until now. The aim of our fundamental research is to measure the thermal diameter of the Sun, which, according to our hypothesis, may be greater than the visible one.

The idea of the experiment involves passive scanning of the celestial sphere with a telescope-reflector with a parabolic mirror. There are sensor resistors in the telescope focal plane heated by solar radiation during the motion of the Sun along the Ecliptic. or data input to the computer, we used a 4-channel analog-to-digital converter. The values of the voltage on the resistors and its temperatures depending on the time we recorded in the data array for further processing and analysis with the help of specially developed hardware and software. Thus, the imbalance of the Wheatstone bridge was recorded using two AME-1102 digital millivoltmeters, which were connected to the computer via the USB interface. Thermal resistors were connected to a two-channel temperature controller DX5100 connected to computer via RS-485 interface. With the help of specially developed software obtained from each channel, we synchronously recorded the unbalance voltage and temperature values in one array. After computer processing, we get: (i) temperature readings of two temperature sensors located on the back of the sensor resistors, and (ii) readings of two voltmeters of control channels with calculated errors depending on time.

In the course of research for the first time we have shown that the thermal diameter of the sun is greater than the visible by at least 12%.

Thus, the use of solar energy with the help of devices designed specifically for the thermal diameter of the Sun can lead to a significant increase in their output power and efficiency compared to devices designed for the visible diameter of the Sun.

**Keywords:** Sun; Wheatstone bridge; thermal gauge; reflecting telescope; solar corona; Sun's angular diameter.

### References:

1. Akopyan A. "The Photon Wandering." *Elements*. N.p., 5 Aug. 2017. Web. <[http://elementy.ru/problems/1546/Bluzhdanie\\_fotona](http://elementy.ru/problems/1546/Bluzhdanie_fotona)>. (In Russian).
2. Basu S., Chaplin W.J., Elsworth Y., New R., Serenelli A.M. "Fresh Insights on the Structure of the Solar Core." *Astrophys. J.* 699 (2009): 1403 – 1417. DOI: 10.1088/0004-637X/699/2/1403.
3. Emspak J. "A "Mangrove Forest" of Magnetism May Help Heat the Sun's Corona." *Smithsonian.com*. N.p., 10 Jun. 2015. Web. <[https://www.smithsonianmag.com/science-nature/mangrove-forest-magnetism-may-heat-suns-corona-180955556/?utm\\_source=smithsoniansciandnat&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=201506-science&spMailingID=22861896&spUserID=ODM4Njc3MTA5NjUS1&spJobID=581626209&spReportId=NTgxNjI2MjA5S0](https://www.smithsonianmag.com/science-nature/mangrove-forest-magnetism-may-heat-suns-corona-180955556/?utm_source=smithsoniansciandnat&utm_medium=email&utm_campaign=201506-science&spMailingID=22861896&spUserID=ODM4Njc3MTA5NjUS1&spJobID=581626209&spReportId=NTgxNjI2MjA5S0)>.
4. Erdélyi R., Ballai I. "Heating of the Solar and Stellar Coronae: A Review." *Astron. Nachr.* 328.8 (2007): 726–733. DOI: 10.1002/asna.20071080.
5. Hathaway D.H. "Solar Physics. Marshall Space Flight Center. The Solar Interior." *NASA Portal*. NASA, 1 Oct. 2015. Web. <<https://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml>>.
6. Kabardin O.F., Orlov V.A., Evenchik E.E. *Manual on Physics for the 10th grade of School and Classes with In-depth Study of Physics*. Ed. A.A. Pinsky. Moscow: Prosveshchenie Publisher, 1995. (In Russian).

БЕЛКОВ В.В., ВАСИЛЬЕВА П.С., КОНДРАТЬЕВ Н.Е., КУШНАРЕВ Д.К., ЦАРЬКОВА О.Г., АНДРЕЕВ С.Н. ТЕПЛОЙ ДИАМЕТР СОЛНЦА

7. Khromova T.P. "Solar Corona." *Physical Encyclopedia*. Ed. A.M. Prokhorov. Moscow: Bolshaya Rossiyskaya Entsiklopedia Publisher, 1994, volume 4. 579–580. (In Russian).
8. Kozlovsky A.N., ed. *Astronomical Calendar for 2018*. Moscow: AstroKA Publisher, 2017. (In Russian).
9. Mitalas R., Sills K.R. "On the Photon Diffusion Time Scale for the Sun." *Astrophys. J.* 401.2, pt. 1 (1992): 759–760.
10. Mullan D.J. "Solar Physics: From the Deep Interior to the Hot Corona." *From the Sun to the Great Attractor. Lecture Notes in Physics*. Eds. D. Page, and J.G. Hirsch. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. 1–47.
11. Myakishev G.Ya., Sinyakov A.Z., Slobodskov B.A. *Textbook for In-depth Study of Physics. Electrodynamics. 10–11 Class*. Moscow: Drofa Publisher, 2002. (In Russian).
12. Pasachoff J.M. "The Great Solar Eclipse of 2017." *In the World of Science* 10 (2017): 22–31. (In Russian).
13. "Surface and Atmosphere of the Sun." *Astronomy on Branch Stub*. D. Klykov (Sternberg Astronomical Institute, Moscow University), n.d. Web. <[http://astrometric.sai.msu.ru/stump/html/1\\_112.html](http://astrometric.sai.msu.ru/stump/html/1_112.html)>. (In Russian).
14. Syunyaev R.A., ed. *Space Physics: The Little Encyclopedia*. Ed. Moscow: Sovetskaya Entsiklopedia Publisher, 1986. 313–315. (In Russian).
15. Williams D.R. "Sun Fact Sheet. Sun. Earth Comparison." *NASA Portal*. NASA, 23 Feb. 2018. Web. <<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>>.
16. Young A. "Living in the Atmosphere of the Sun. The 8-minute Travel Time to Earth by Sunlight Hides a Thousand-year Journey that Actually Began in the Core." *NASA Portal*. NASA, 2007. Web. <[https://sunearthday.nasa.gov/2007/locations/ttt\\_sunlight.php](https://sunearthday.nasa.gov/2007/locations/ttt_sunlight.php)>.

**Cite MLA 7:**

Belkov, V. V., P. S. Vasileva, N. E. Kondratyev, D. K. Kushnarev, O. G. Tsarkova, and S. N. Andreev. "Thermal Diameter of the Sun." *Electronic Scientific Edition Almanac Space and Time* 16.3–4 (2018). DOI: 10.24411/2227-9490-2018-12031. Web. <2227-9490e-aprovr\_e-ast16-3\_4.2018.031>. (In Russian).