



# **Методика разделения суммарной радиации на составляющие ее прямую и рассеянную**

## **Technique for separation of total irradiance into direct and diffuse components**

Зуев С. В.

[zuev@imces.ru](mailto:zuev@imces.ru)

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, г. Томск,  
пр. Академический, д. 10/3

# Актинометрические наблюдения

Актинометрические наблюдения имеют целью получение данных о радиационном режиме земной поверхности, необходимых для научных целей и практического использования в различных отраслях народного хозяйства.

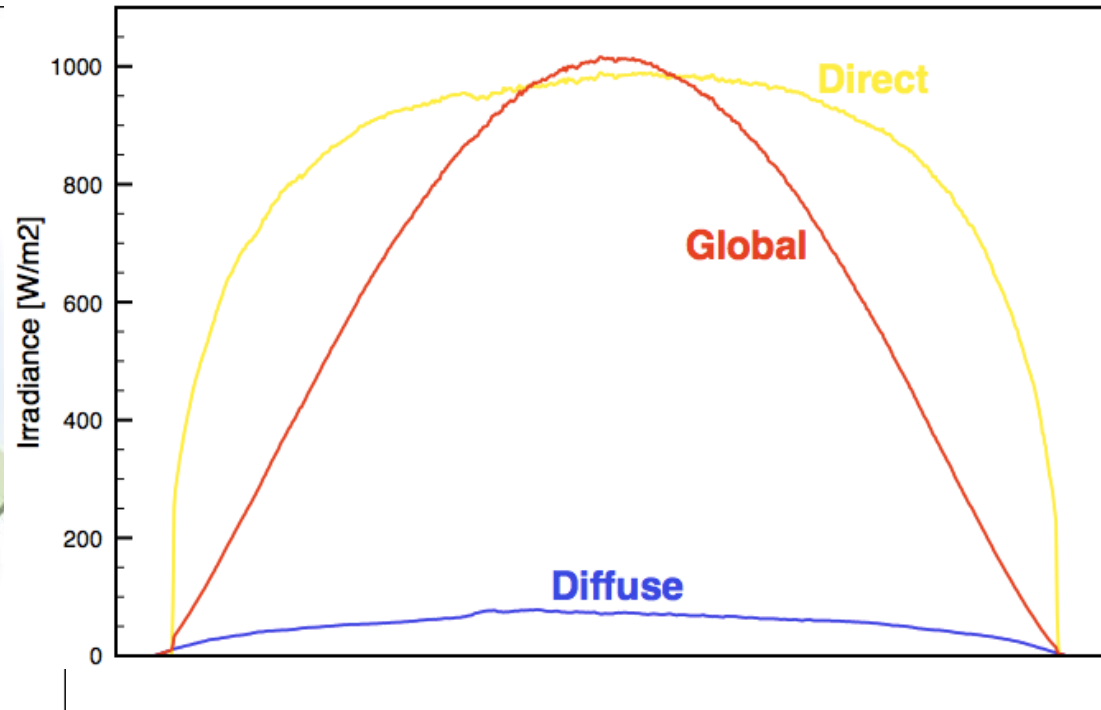
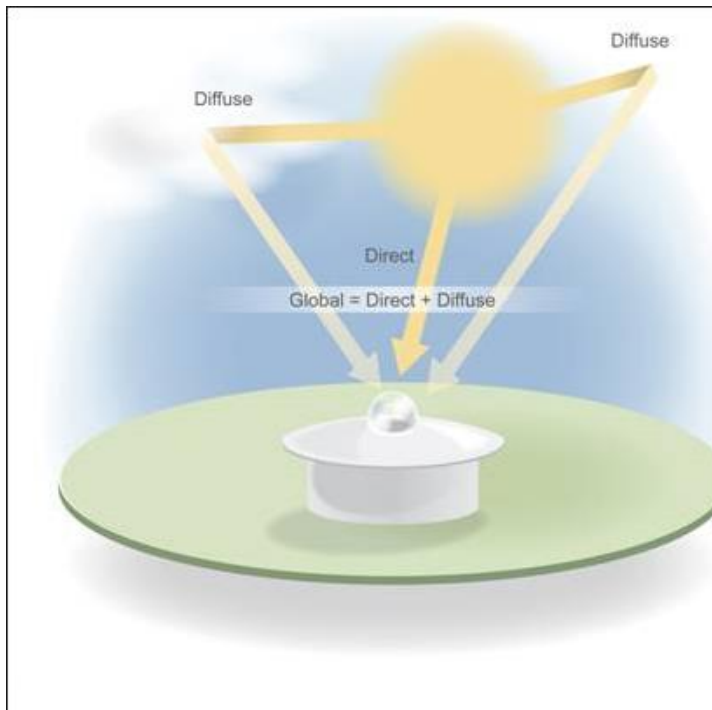
Прозрачность (мутность) атмосферы, суммы солнечной радиации и др.

99 % солнечной энергии  $\lambda = 0,17 \div 4,0$  мкм

Основные измеряемые элементы приходящей к земной поверхности солнечной радиации:

$$Q = S \cdot \sin h + D$$

# Измерение основных актинометрических величин



<https://rratlas.energy.gov.sa>

<http://homedesignideas.cricket>

$$Q = S \cdot \sin h + D$$

# Приборы для измерения солнечной радиации.



$$Q = S \cdot \sin h + D$$

# Приборы для измерения солнечной радиации.



Измерение только суммарной радиации

$$Q = S \cdot \sin h + D.$$

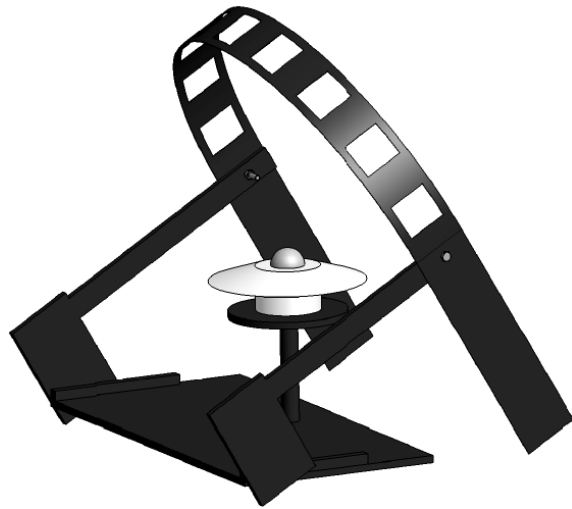
Одно уравнение с двумя неизвестными.

Требуется дополнительная информация для разделения  $Q$  на  $S$  и  $D$  (напр., определение  $D$  периодическим затенением пиранометра ( $S = 0$ )).



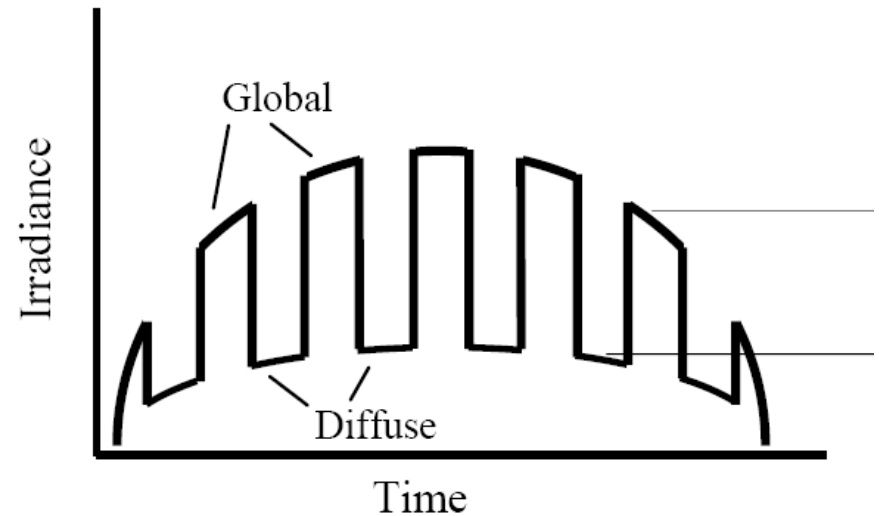
$$\begin{cases} Q = S \cdot \sin h + D, \\ Q = D \end{cases}$$

# Приборы для измерения солнечной радиации.



Michael J. Brooks, et al.

Zebra band



$$\begin{cases} Q = S \cdot \sin h + D, \\ Q = D \end{cases}$$

# Приборы для измерения солнечной радиации.



7 датчиков

$$\begin{cases} Q_{max} = S \cdot \sin h + D - \Delta D, \\ Q_{mix} = D - \Delta D, \\ \Delta D = \frac{1}{2} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} S \cdot \sin h &= Q_{max} - Q_{min}, \\ D &= 2 \cdot Q_{min}, \\ Q &= Q_{max} + Q_{min}, \\ T_{SS} &= t(S \geq Threshold) \end{aligned}$$

Sunshine pyranometer SPN-1.

Delta-T Devices Ltd

$$Q = S \cdot \sin h + D$$

$$\Delta D = \frac{1}{2} D \Rightarrow \frac{1}{n} D, \quad n \geq 2$$

# Многоэлементный измеритель ИМКЭС СО РАН



2 пиранометра М-80М,  
регистратор.

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{6} \quad \text{Для июня } h_{max} = 57^\circ$$

$$\begin{cases} Q_{max} = S \cdot \sin h + D - \Delta D, \\ Q_{mix} = D - \Delta D, \\ \Delta D = \frac{1}{n}, \quad n \geq 2 \end{cases}$$

$$S \cdot \sin h = Q_{max} - Q_{min},$$

$$D = \frac{n}{n-1} \cdot Q_{min},$$

$$Q = Q_{max} + \frac{1}{n-1} \cdot Q_{min}$$

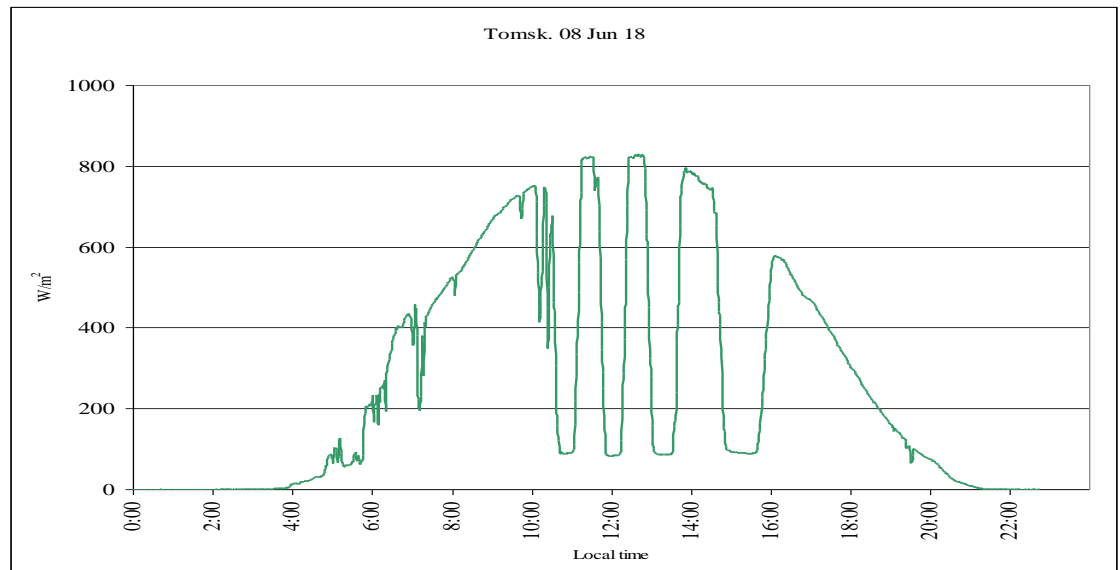
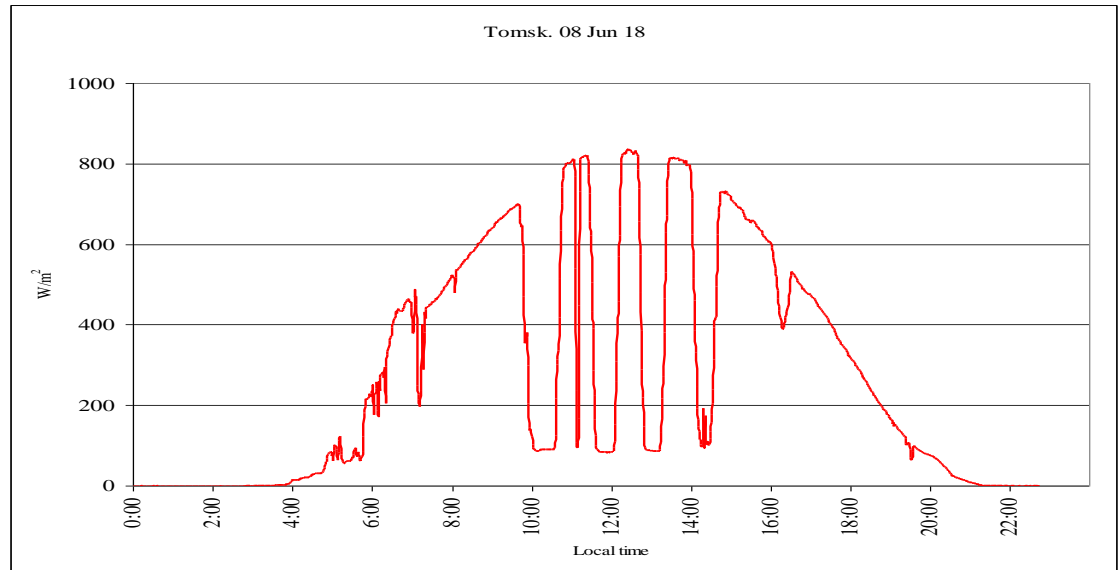


# Многоэлементный измеритель ИМКЭС СО РАН

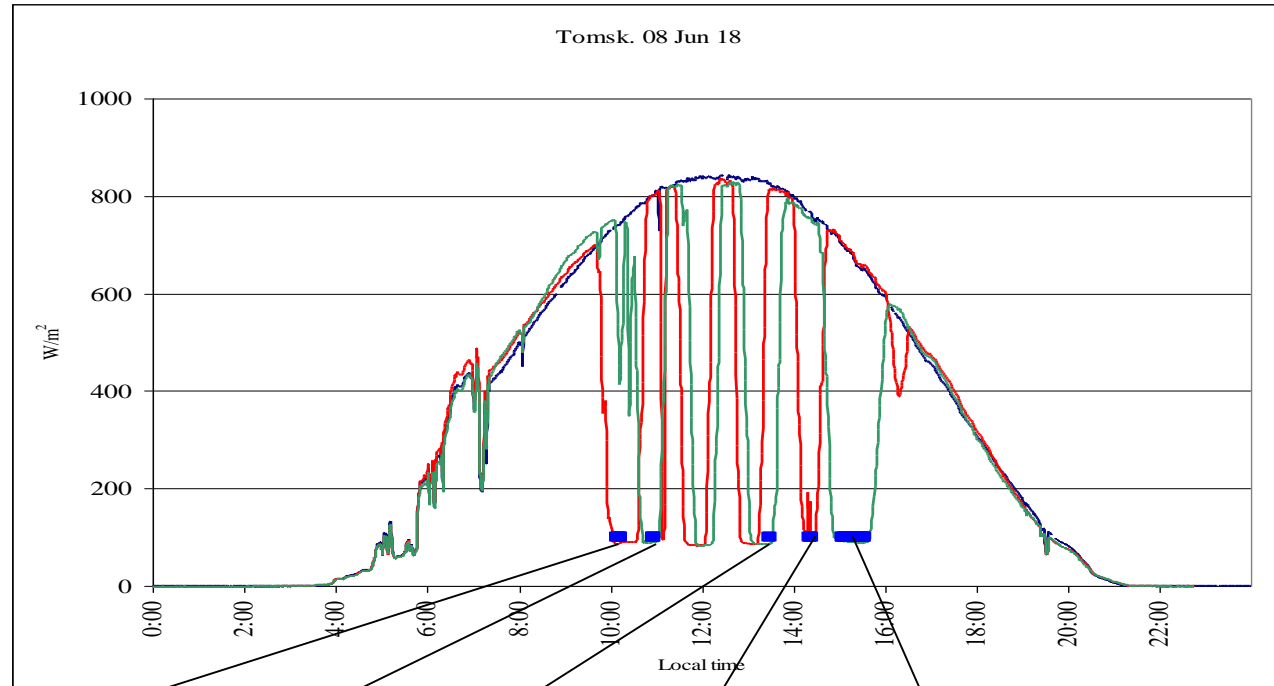


2 пиранометра М-80М,  
регистратор.

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{6}$$



# Многоэлементный измеритель ИМКЭС СО РАН



Сравнение с  $Q$  СМ11:

$n = 2: V_Q = 0,02;$

$n = 6: V_Q = 0,01;$

$n = 5: V_Q = 0;$

$n = 20: V_Q = 0,03;$

$n = 36: V_Q = 0,03.$

# Цель работы

Создание методики разделения суммарной радиации ( $Q = S \cdot \sin h + D$ ), измеряемой с помощью незатененного пиранометра, на составляющие ее прямую  $S'$  и рассеянную  $D$  радиацию (в первую очередь для ясного неба и при кучевой облачности).

Дополнительная информация – отношение справочных значений  $S_0^*/D_0^*$  и использование непросвечивающих облаков в качестве естественного затеняющего экрана для получения уравнения  $Q = D$ .

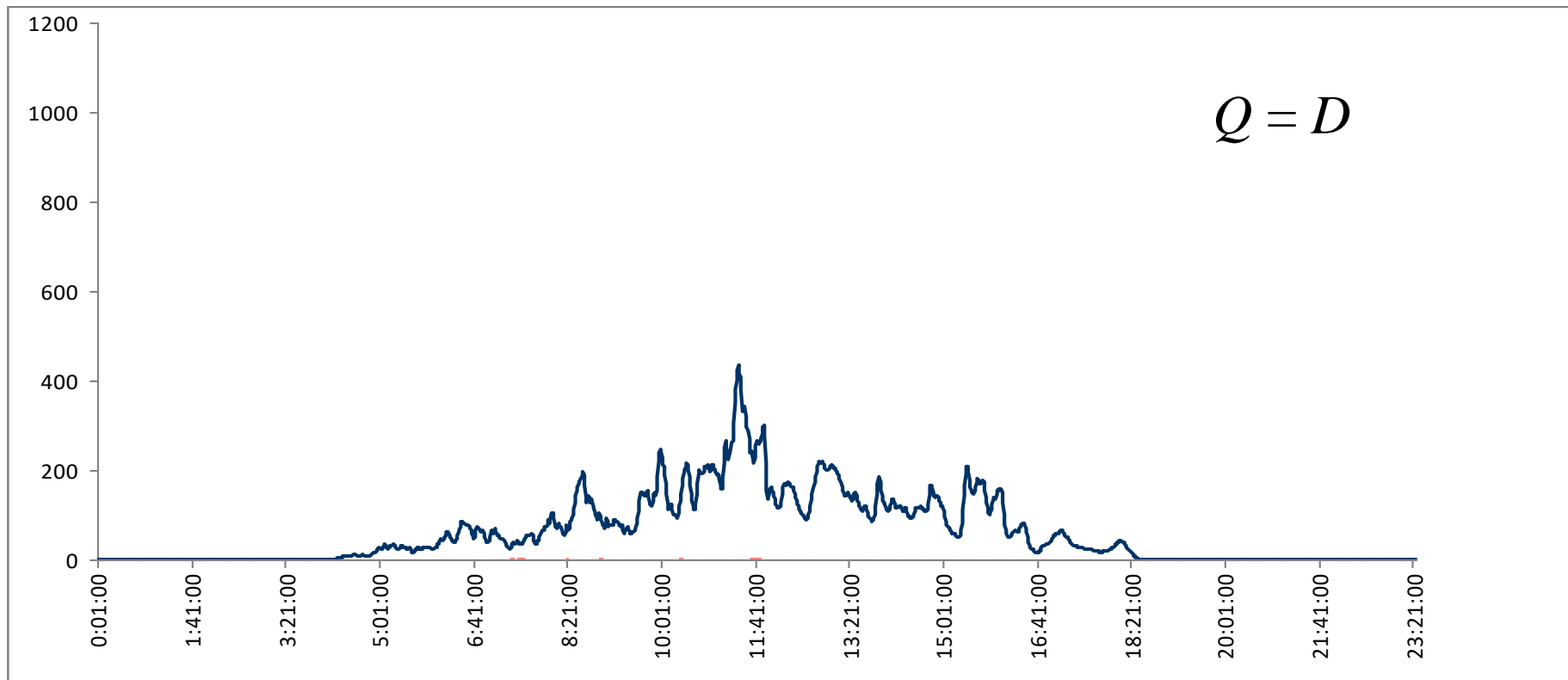
# Исходные данные

1. Измеренные значения суммарной радиации  $Q$ .
2. Средние многолетние значения суммарной  $Q_0^*$ , прямой  $S_0^*$  и рассеянной  $D_0^*$  радиации при ясном небе для данной местности (справочные) при высоте Солнца  $\geq 30^\circ$  [Научно-прикладной справочник по климату СССР.1993].

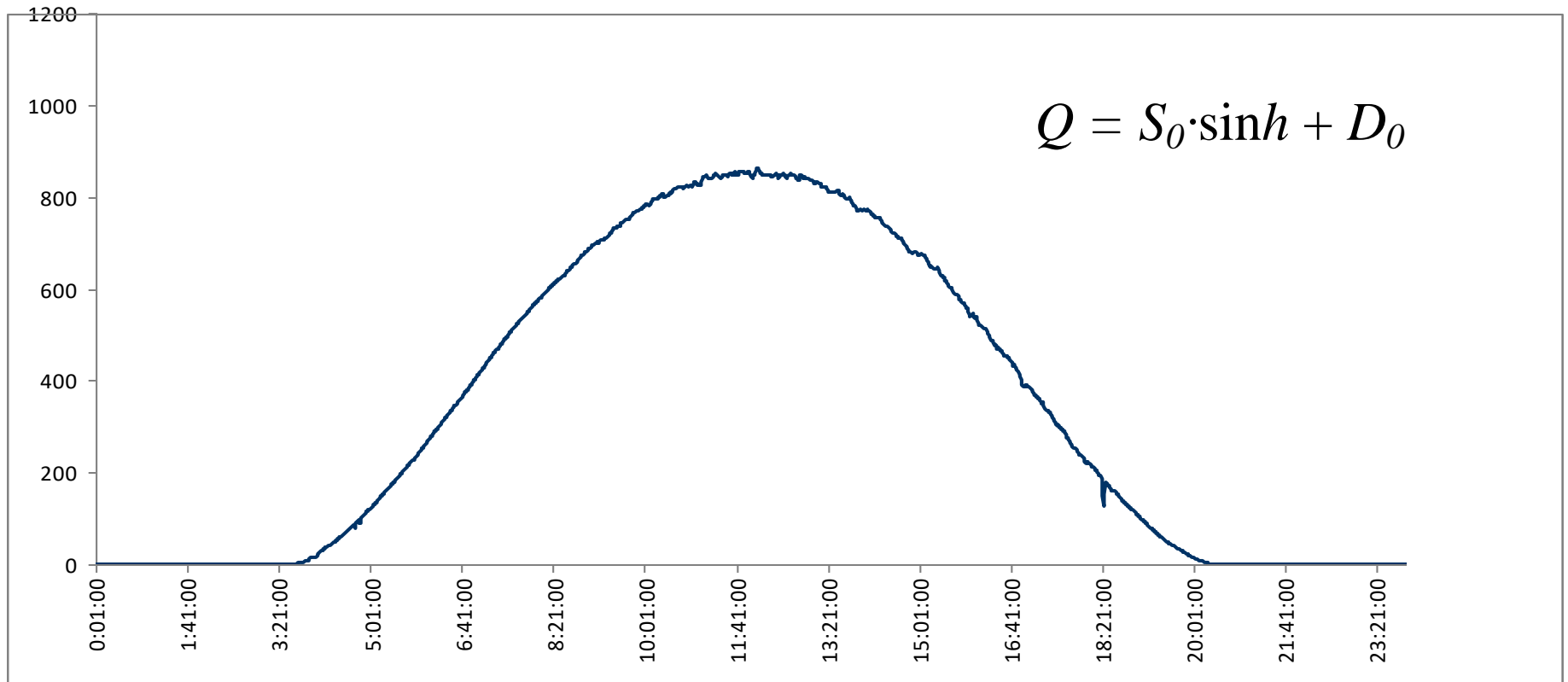
# Допущения и ограничения методики

1. Симметричный суточный ход солнечной радиации относительно полудня.
2. Прозрачность атмосферы не меняется в течение светлого времени суток.
3. Наличие участков ясного неба (20 мин. и более) на суточном ходе измеренной суммарной радиации  $Q$ .

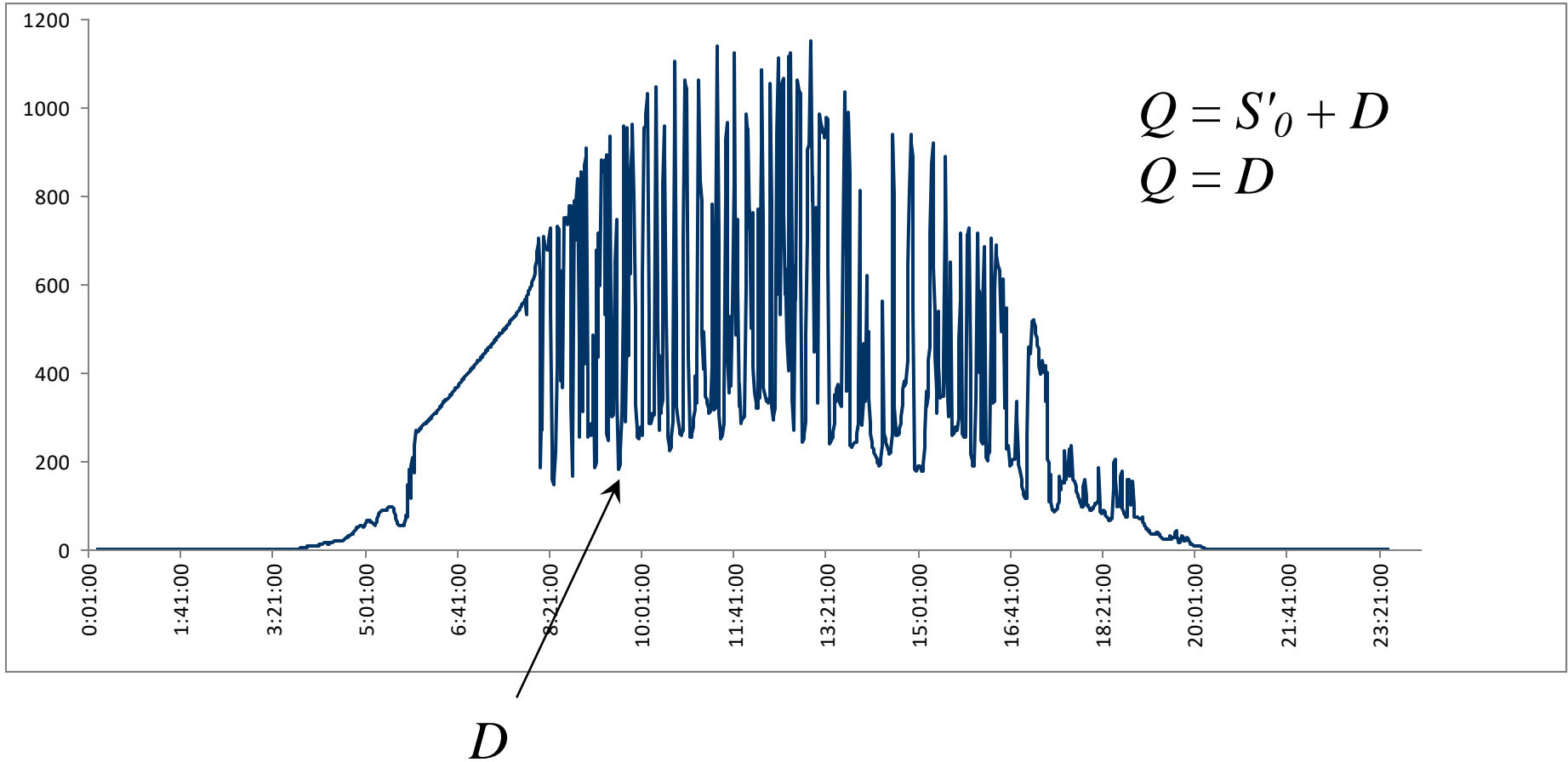
# Суммарная радиация. Пасмурно



# Суммарная радиация. Ясно



# Суммарная радиация. $S_i$

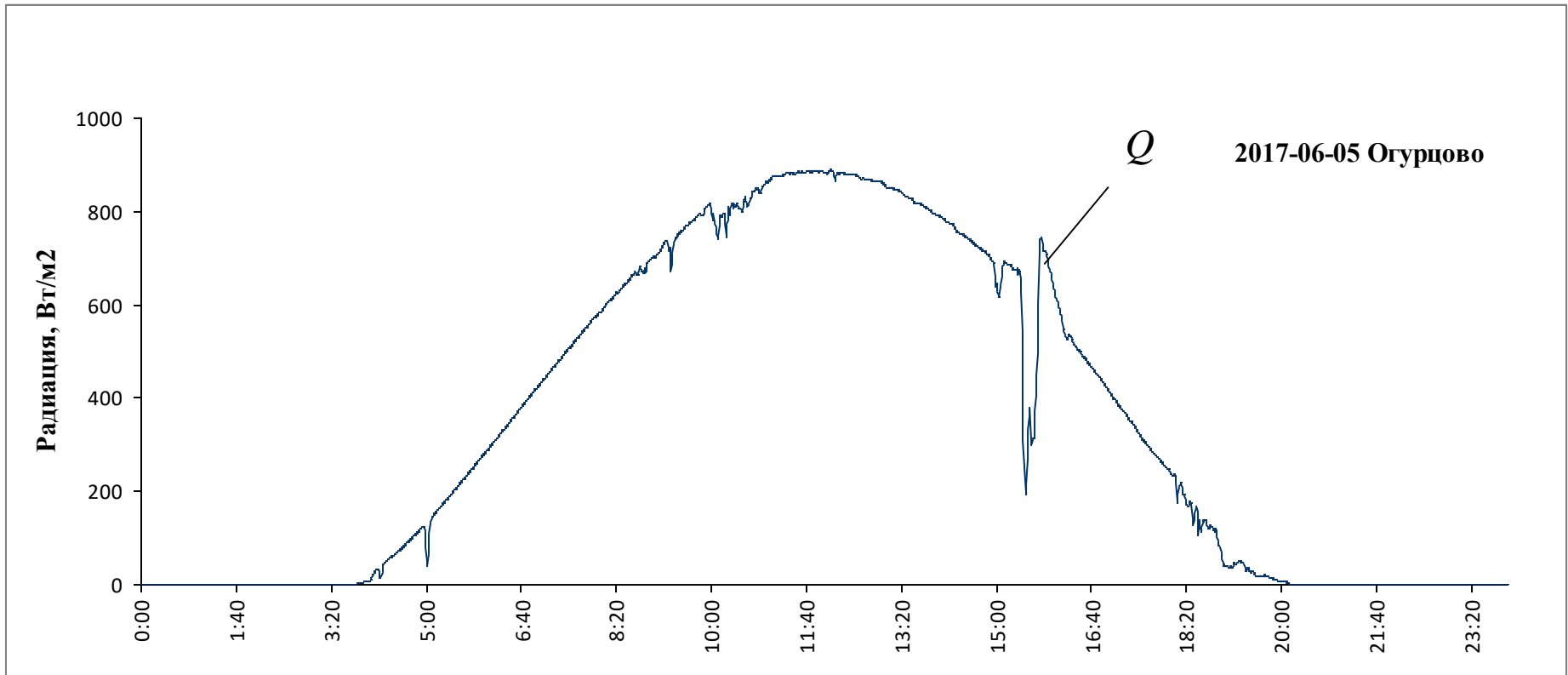




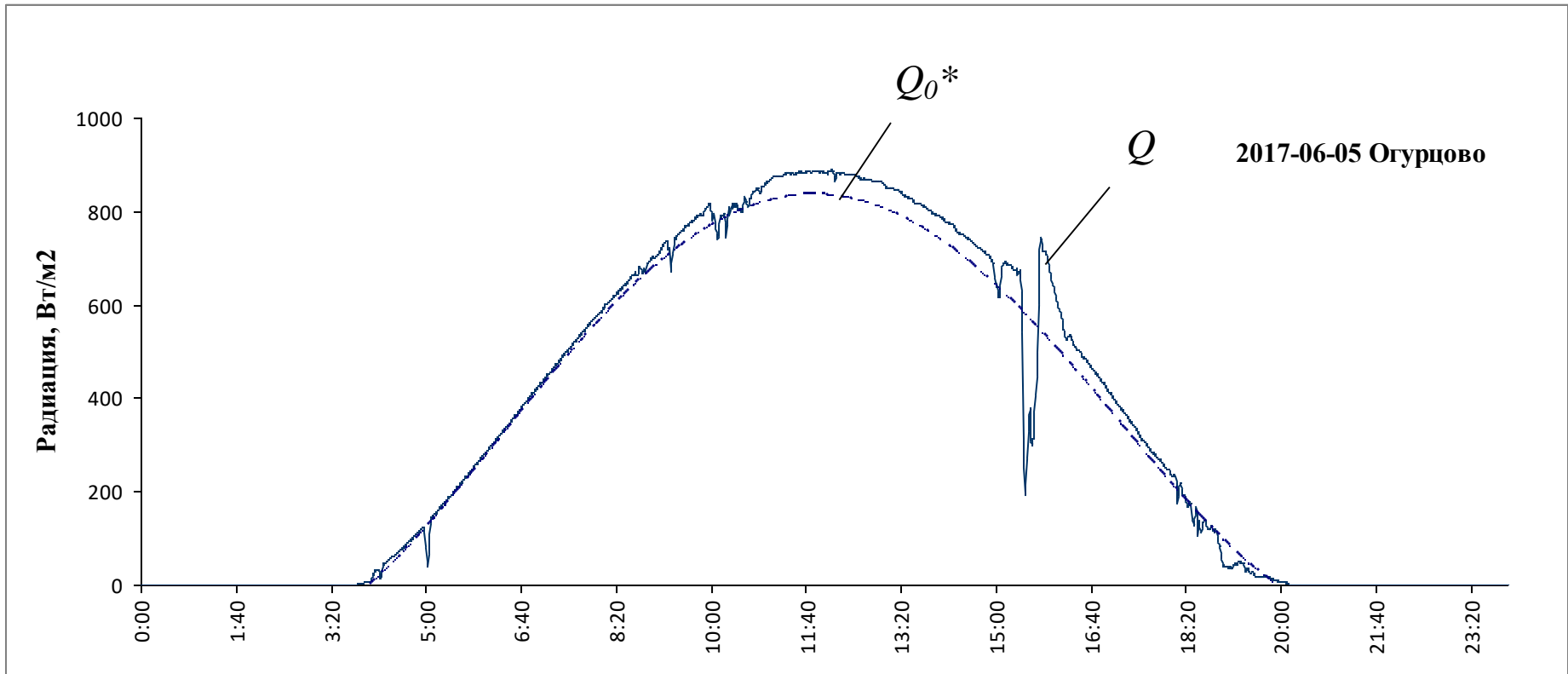
# Этапы методики

1. Моделирование суточного хода суммарной радиации при ясном небе  $Q_0$ .
2. Моделирование суточного хода рассеянной радиации при ясном небе  $D_0$ .
3. Определение значений рассеянной  $D_Q$  и прямой  $S_Q$  радиации.

# 1. Модель суточного хода суммарной радиации при ясном небе $Q_0$

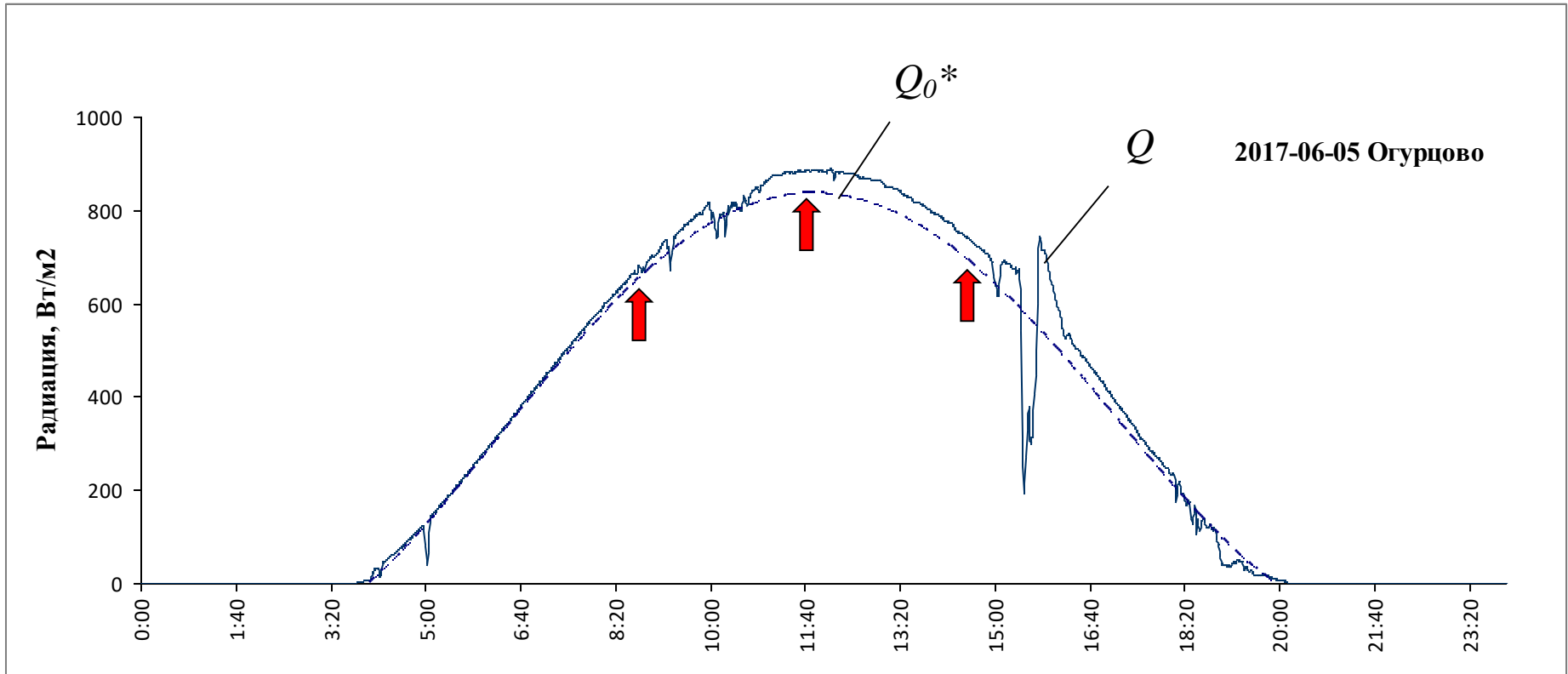


# 1. Модель суточного хода суммарной радиации при ясном небе $Q_0$



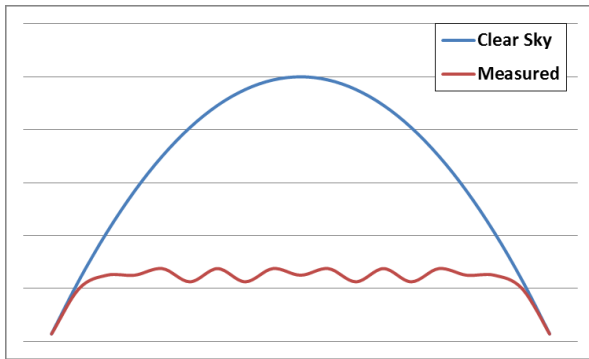
$$Q_0^* = 8,846 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 - 2,498 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,021 \cdot x^2 - 4,377 \cdot x + 165$$

# 1. Модель суточного хода суммарной радиации при ясном небе $Q_0$

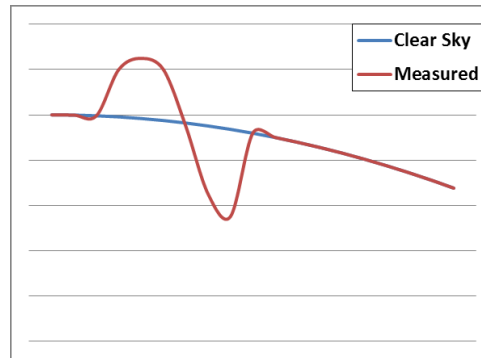


$$Q_0^* = 8,846 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 - 2,498 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,021 \cdot x^2 - 4,377 \cdot x + 165$$

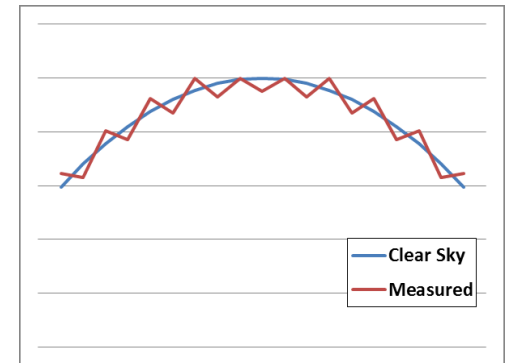
# 1. Модель суточного хода суммарной радиации при ясном небе $Q_0$



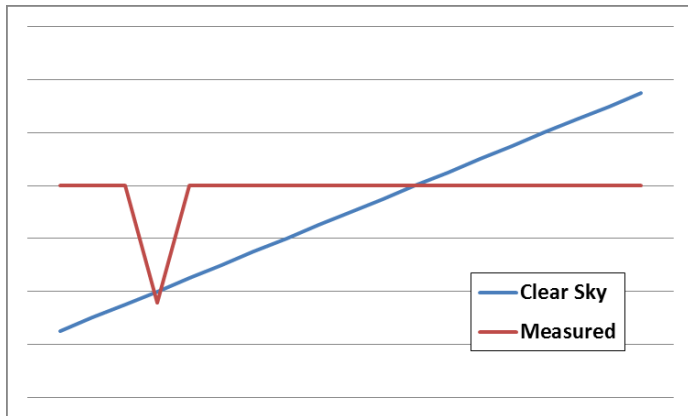
$$\bar{G} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n GHI_i$$



$$M = \max[GHI_i] \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$$



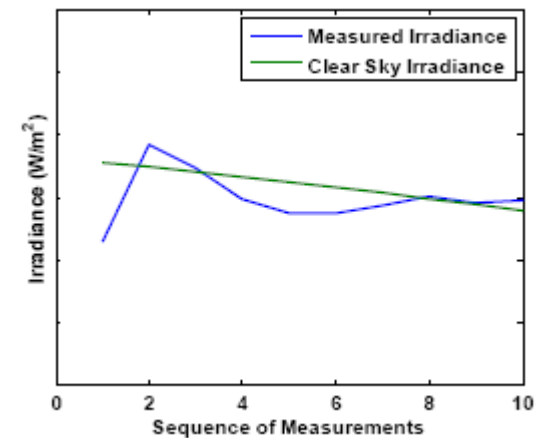
$$L = \sum_{i=1}^n \sqrt{(GHI_{i+1} - GHI_i)^2 + (t_{i+1} - t_i)^2}$$



$$s_i = GHI_{i+1} - GHI_i, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

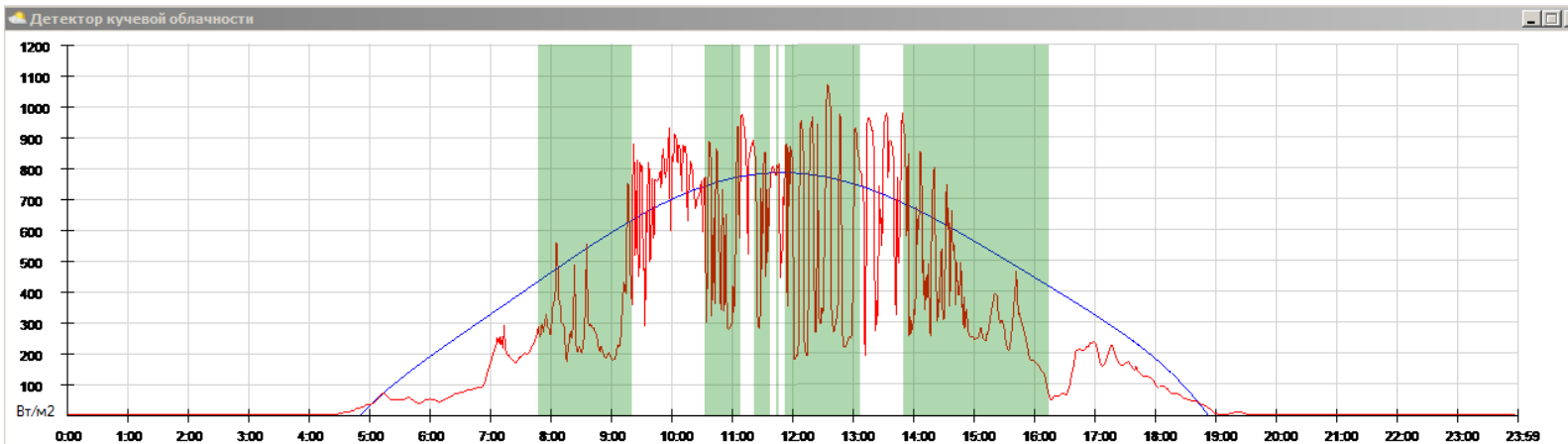
$$\bar{s} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} s_i$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (s_i - \bar{s})^2} \quad \Bigg/ \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n GHI_i$$



Matthew J. Reno, et al. 2012. **Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis**

# 1. Модель суточного хода суммарной радиации при ясном небе $Q_0$



$$C_Q = Q_{cp} / Q_0$$

$$V_Q = \sigma / Q_{cp}$$

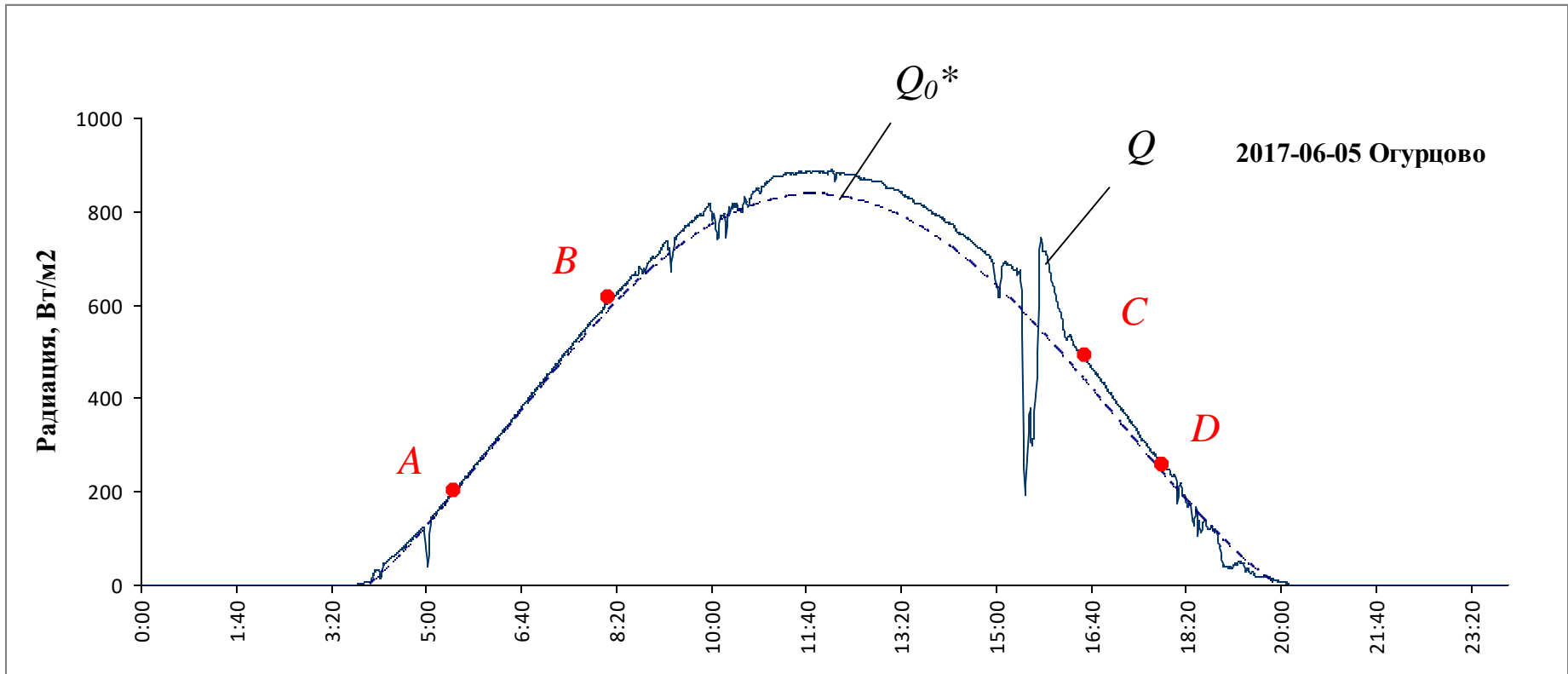
за 20-мин.  
период

Дата: 14 мая 2018 (невисокосный год) Исходный файл: D:\Design\IMCES\Data\_Ogurtsovo\2018\h06R1805\TAAK\M\K14201805.csv

Загрузить документ	Время	Q, гВт/м2	№	LST	HRA	sinH	arcsin H	Градус Солнца над у.з.	Q при ясном небе
Сохранить файл в формате .csv	00:01:00	0	1	0.02	-179.7	-0.2584	-0.261	-14.954	
Сохранить файл в формате .xlsx	00:02:00	0	2	0.03	-179.55	-0.2584	-0.261	-14.954	
Построить график	00:03:00	0	3	0.05	-179.25	-0.2584	-0.261	-14.954	
Отобразить кучевую облачность	00:04:00	0	4	0.07	-178.95	-0.2583	-0.261	-14.954	
	00:05:00	0	5	0.08	-178.8	-0.2583	-0.261	-14.954	
	00:06:00	0	6	0.1	-178.5	-0.2583	-0.261	-14.954	
	00:07:00	0	7	0.12	-178.2	-0.2582	-0.261	-14.954	
	00:08:00	0	8	0.13	-178.05	-0.2581	-0.261	-14.954	
	00:09:00	0	9	0.15	-177.75	-0.258	-0.261	-14.954	
	00:10:00	0	10	0.17	-177.45	-0.2579	-0.261	-14.954	
	00:11:00	0	11	0.18	-177.3	-0.2579	-0.261	-14.954	
	00:12:00	0	12	0.2	-177	-0.2577	-0.261	-14.954	
	00:13:00	0	13	0.22	-176.7	-0.2576	-0.261	-14.954	

Настройки  
 День по счету (d): 134  
 Широта: 56,48  
 Скрытые столбцы:  
 Q, гВт/м2  Градус Солнца над у.з.  
 №  Q при ясном небе  
 LST  CQ  
 HRA  VQ  
 sinH  Генетич-я классификация  
 arcsinH  Состояние неба  
 Кучево-обр. | Волнисто-обр. | Слоисто-обр.  
 CQ меньше: 0,9 VQ больше: 0,1

# 1. Модель суточного хода суммарной радиации при ясном небе $Q_0$

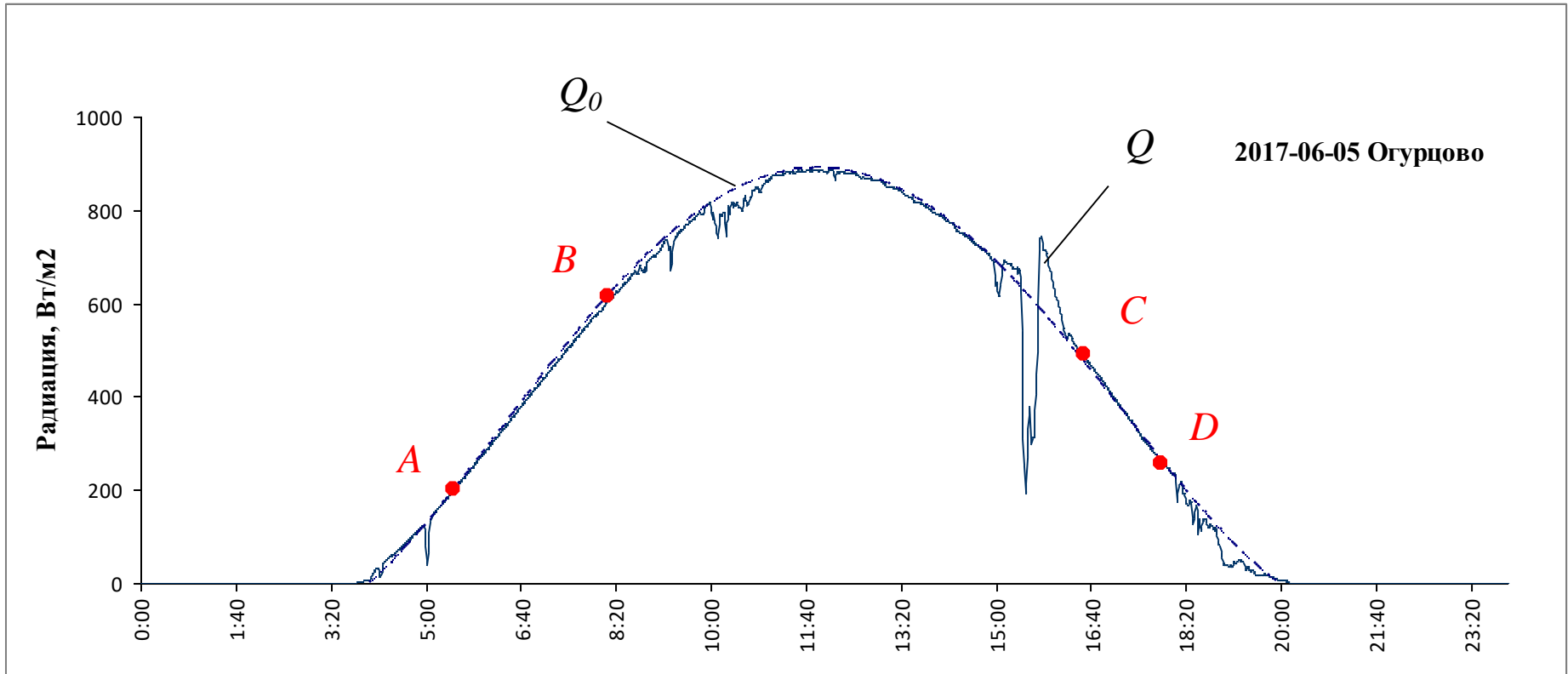


$$\sigma_{AB}^* = 15 \text{ Вт/м}^2 \quad n = 150$$

$$\sigma_{CD}^* = 26 \text{ Вт/м}^2 \quad n = 60$$

$$Q_0^* = 8,846 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 - 2,498 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,021 \cdot x^2 - 4,377 \cdot x + 165$$

# 1. Модель суточного хода суммарной радиации при ясном небе $Q_0$



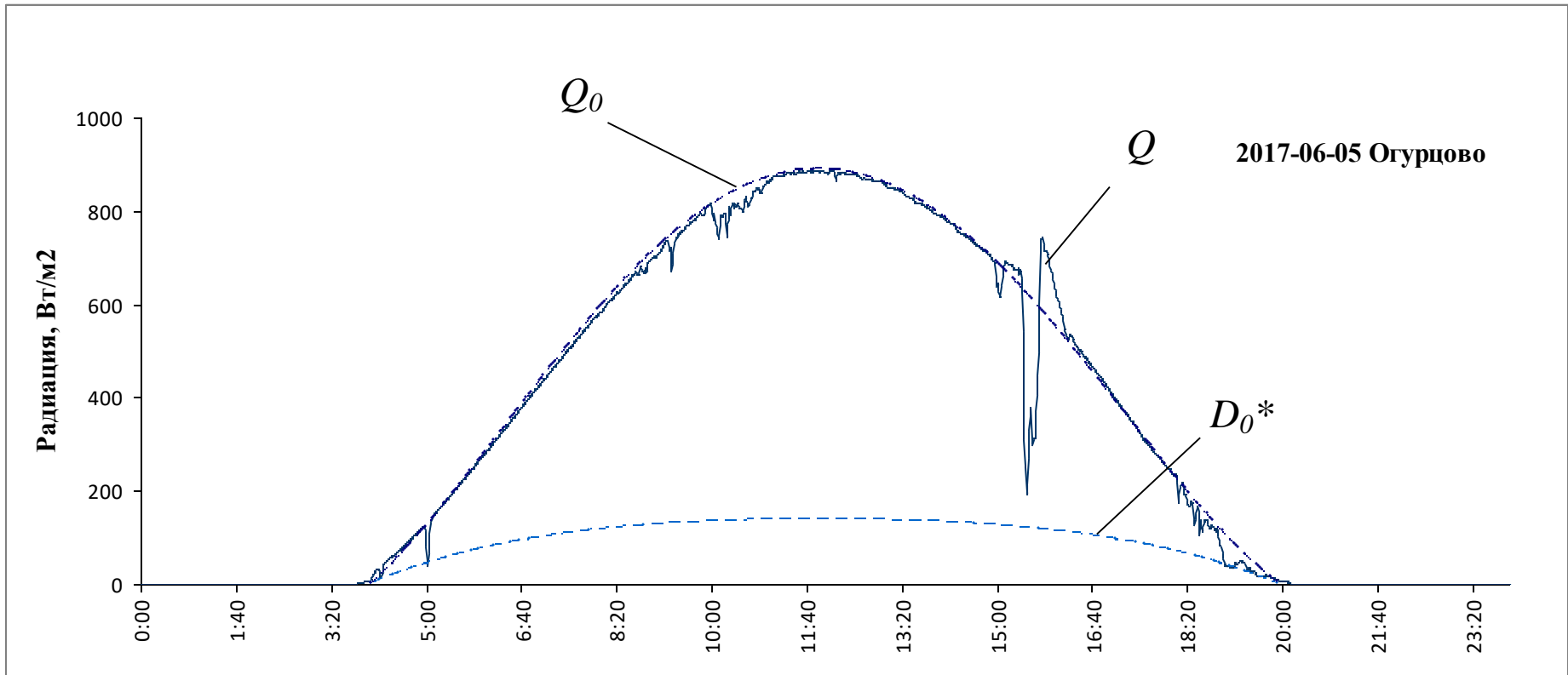
$$\sigma_{AB} = 4 \text{ Вт/м}^2 \quad n = 150$$

$$\sigma_{CD} = 3 \text{ Вт/м}^2 \quad n = 60$$

$$Q_0 = 9,554 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 - 2,716 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,023 \cdot x^2 - 5,043 \cdot x + 233$$



## 2. Модель суточного хода рассеянной радиации при ясном небе $D_0$



$$D_0^* = -1,236 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 + 3,57 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,004 \cdot x^2 + 2,329 \cdot x - 364$$

## 2. Модель суточного хода рассеянной радиации при ясном небе $D_0$

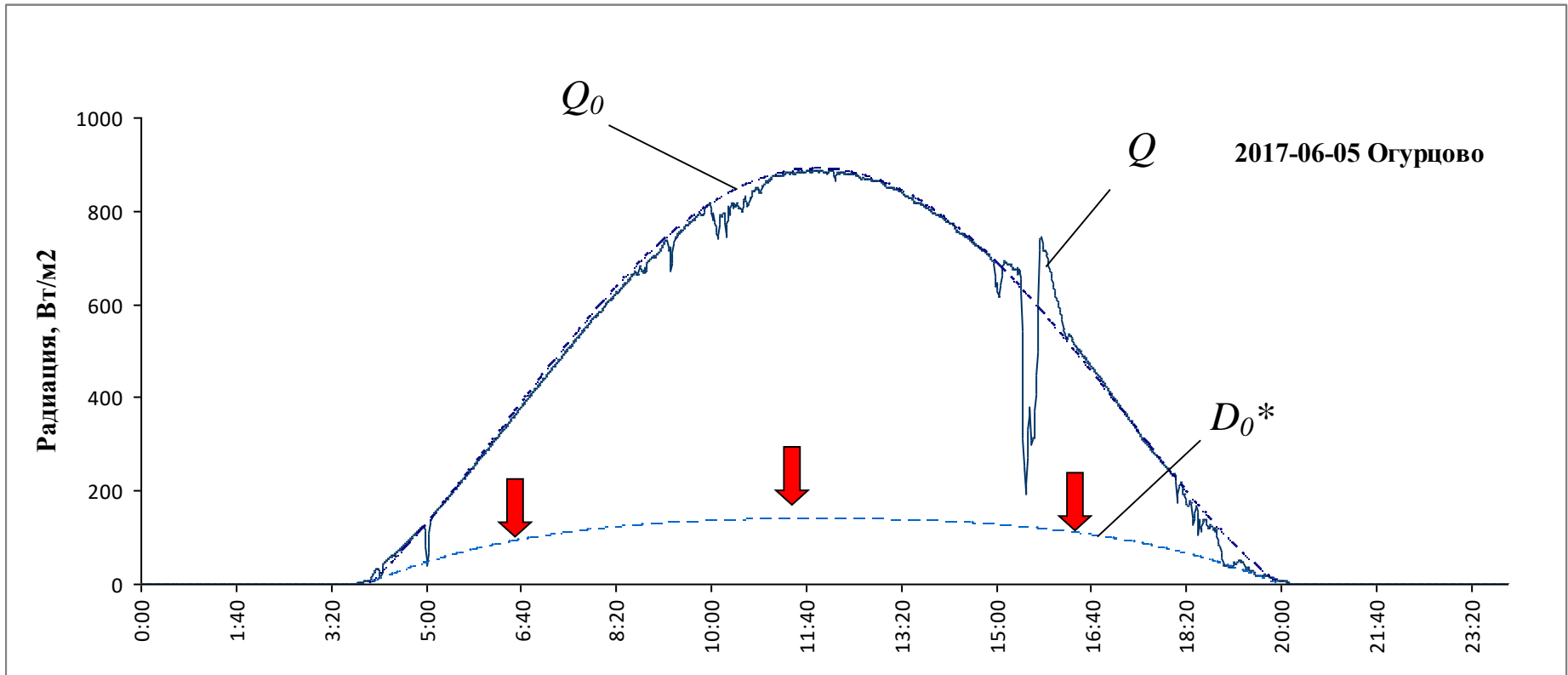
Величина отношения прямой и рассеянной радиации при отсутствии облаков для любых значений  $S$  практически линейно зависит от прозрачности атмосферы и ее можно считать величиной постоянной [Сивков. Методы расчета характеристик солнечной радиации (с. 130)]. Следовательно, для средней (справочной) прозрачности атмосферы можно принять

$$\frac{S_0^*}{D_0^*} = r_h.$$

Тогда, для величин изменения с учетом противоположности изменения прямой и рассеянной радиации

$$\frac{\Delta S'_0}{\Delta D_0} = -r_h \cdot \sin h \quad \Rightarrow \quad \Delta D_0 = -\frac{\Delta Q_0}{r_h \cdot \sin h + 1}$$
$$\Delta Q_0 = \Delta S'_0 - \Delta D_0$$

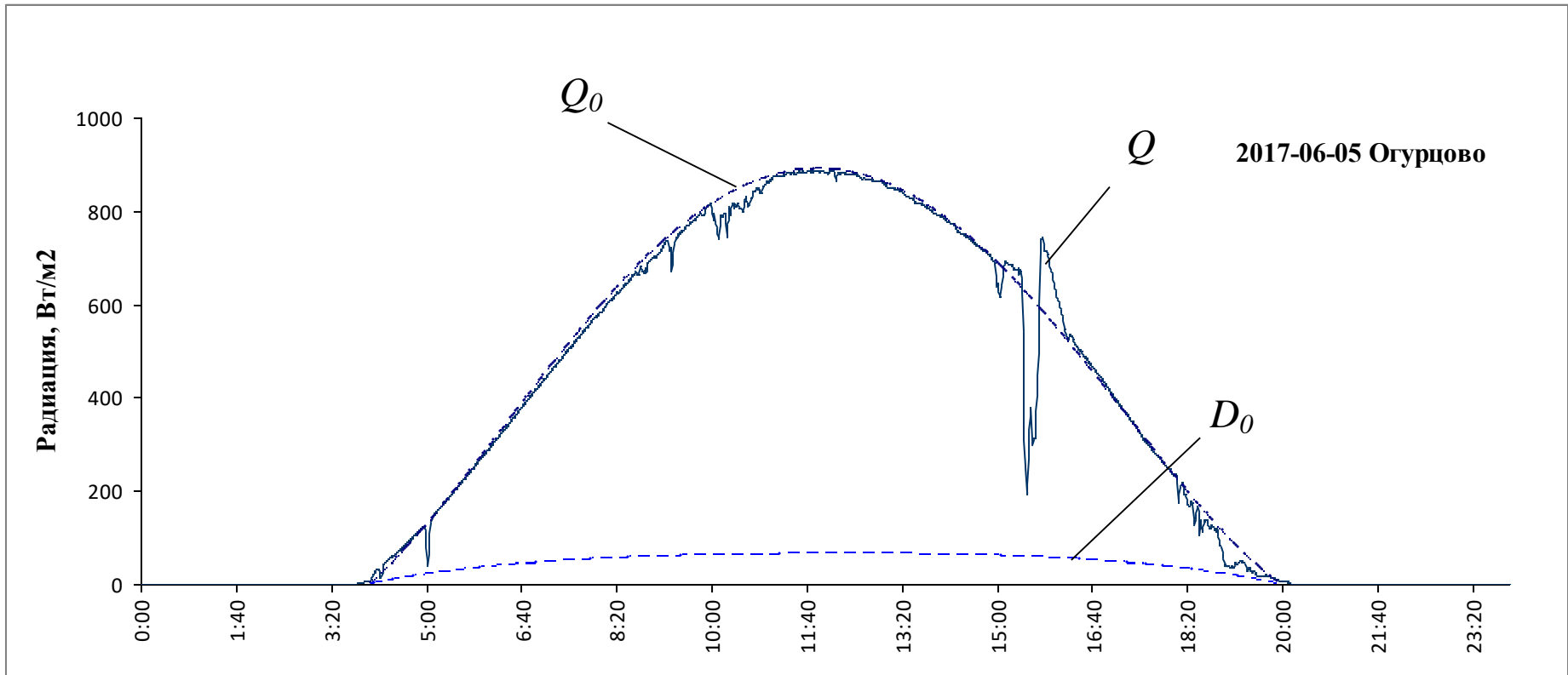
## 2. Модель суточного хода рассеянной радиации при ясном небе $D_0$



$$\Delta Q_0 > 0 \Rightarrow \Delta S_0' > 0 \Rightarrow \Delta D_0 < 0 \quad \Delta D_0 = -\frac{\Delta Q_0}{r_h \cdot \sin h + 1}$$

$$D_0^* = -1,236 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 + 3,57 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,004 \cdot x^2 + 2,329 \cdot x - 364$$

## 2. Модель суточного хода рассеянной радиации при ясном небе $D_0$



$$D_0 = -6,629 \cdot 10^{-10} \cdot x^4 + 1,877 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,002 \cdot x^2 + 1,136 \cdot x - 175$$

### 3. Определение значений рассеянной $D_Q$ и прямой $S_Q$ радиации

$$D_Q = Q - (Q_0 - D_0) \cdot p,$$

$p$  – коэффициент пропускания  $S$  облачным слоем покрывающим диск Солнца.

$p = 1$  – открытое Солнце;

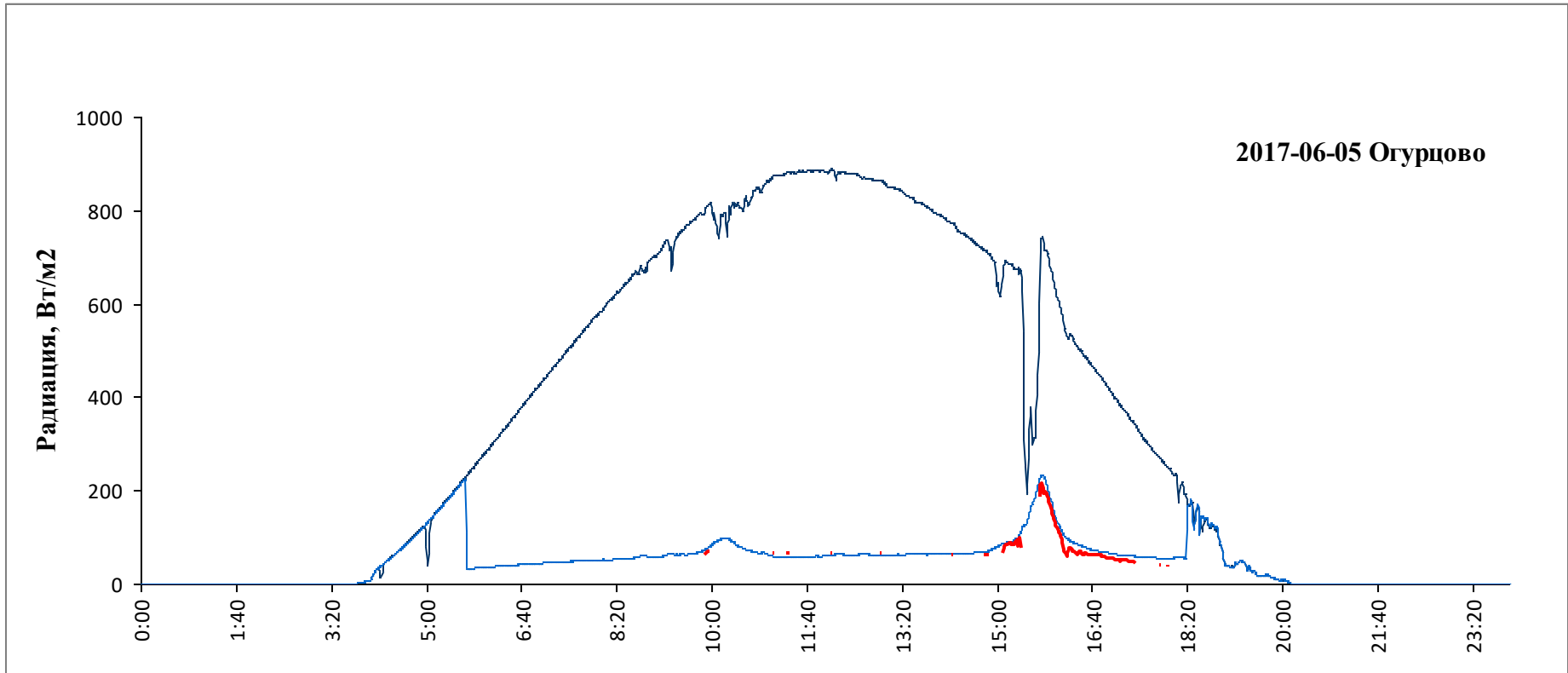
$p = 0$  – Солнце закрыто непросвечивающими облаками.

Для просвечивающих облаков, учитывая, что они оказывают слабое влияние на величину  $S$  и  $D$ , коэффициент пропускания можно определять приближенно по формуле

$$p \approx \frac{Q}{Q_0}$$

Для полупросвечивающих облаков необходимо инструментальное определение коэффициента  $p$ . Небольшие по времени пропуски в ряде значений  $D_Q$  можно заполнять с помощью какого-либо метода интерполяции, учитывая, что рассеянная радиация, в отличие от прямой, не может изменяться скачкообразно.

### 3. Определение значений рассеянной $D_Q$ и прямой $S_Q$ радиации

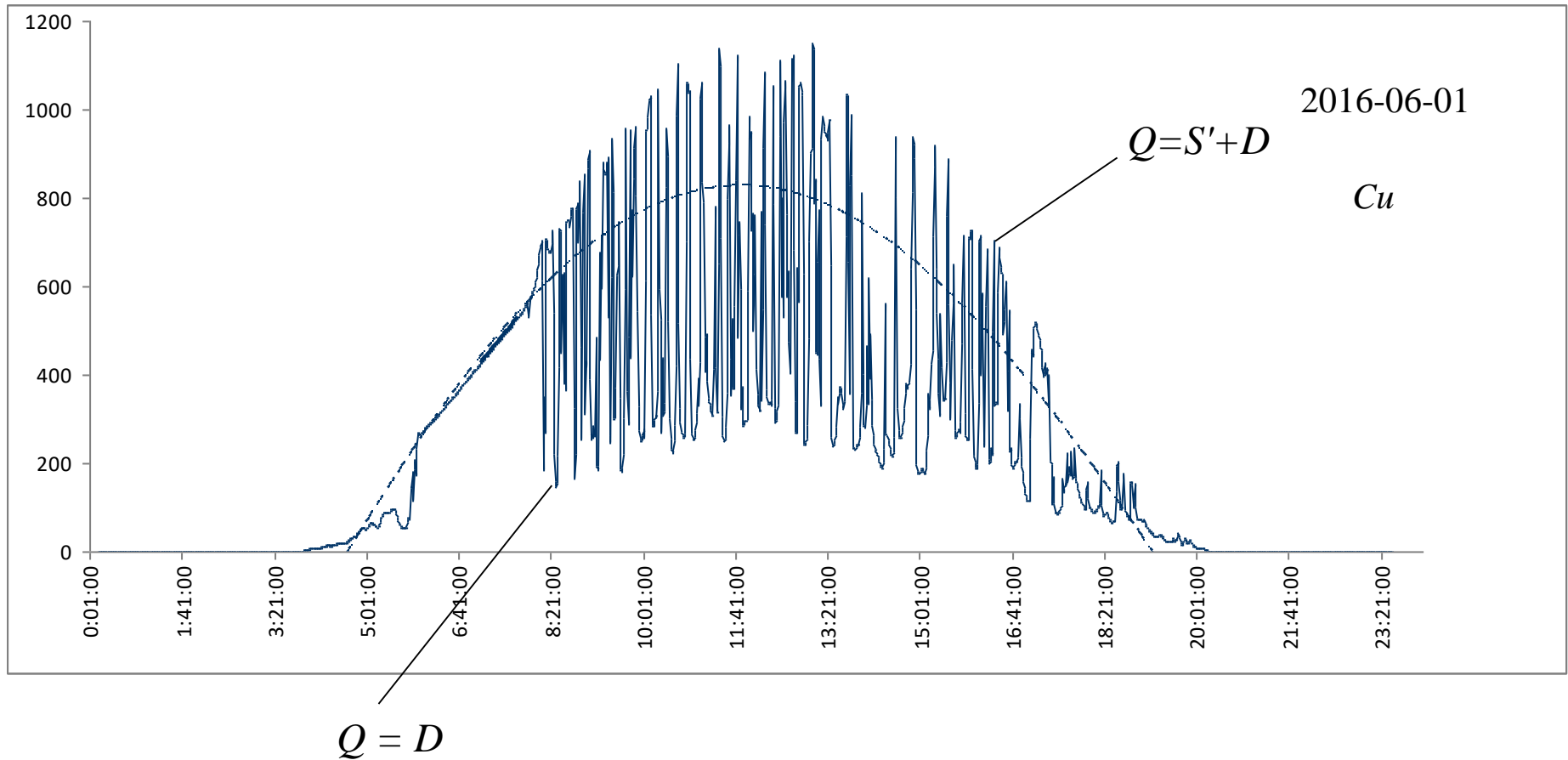


Без заполнения пропусков:  $n = 152, \sigma = 14$

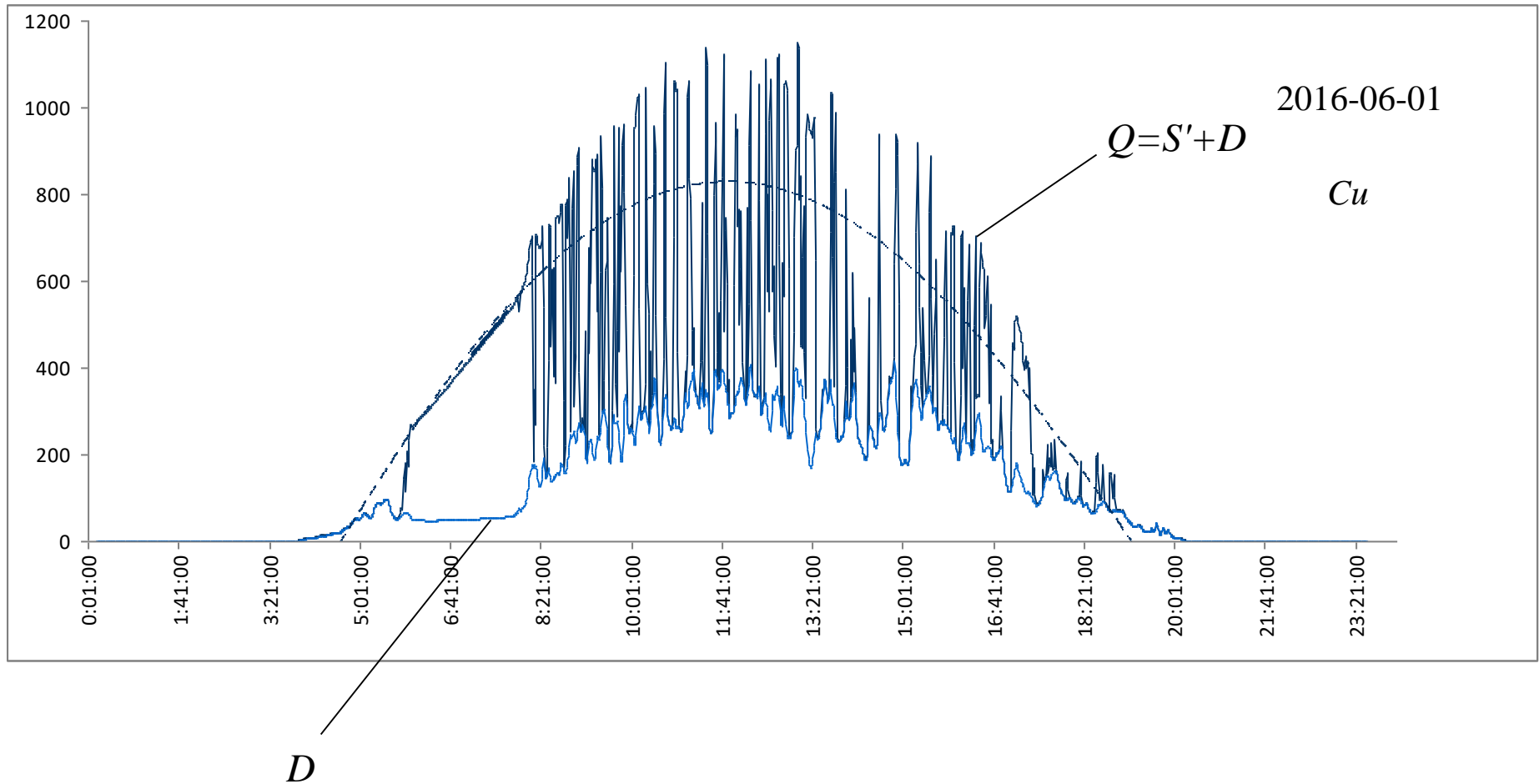
$$Q > Q_0$$

Заполнение пропусков линейной интерполяцией:  $n = 488, \sigma = 23$

### 3. Определение значений рассеянной $D_Q$ и прямой $S_Q$ радиации



### 3. Определение значений рассеянной $D_Q$ и прямой $S_Q$ радиации





### 3. Определение значений рассеянной $D_Q$ и прямой $S_Q$ радиации

$$S_Q = \frac{Q - D_Q}{\sin h}$$

Коэффициент прозрачности атмосферы

$$P = \sqrt{\frac{S_{30^\circ}}{S_0}}$$

Фактор мутности

$$T = 11,5 \cdot \lg \frac{S_0}{S_{30^\circ}}$$

Продолжительность солнечного сияния

# Заключение

Точность предлагаемой методики в первую очередь зависит от точности построения модели суммарной радиации при ясном небе, для чего на суточном ходе должны присутствовать участки ясного неба. Наиболее хорошие результаты методика показывает при кучевой и кучево-дождевой облачности, когда коэффициент  $\rho$  в большинстве случаев принимает значения 0 или 1 и которые достаточно просто определить. Для просвечивающих или полупросвечивающих облаков, которыми в большинстве случаев являются облаками верхнего и среднего ярусов, коэффициент пропускания предпочтительно определять инструментально, напр., с помощью лидарного зондирования.

Работа выполняется в рамках  
проекта фундаментальных исследований  
СО РАН IX.138.2.5 "Научно-методические  
основы создания и использования технологий и  
информационно-измерительных комплексов для  
дистанционного мониторинга нижнего слоя  
атмосферы".



# **Методика разделения суммарной радиации на составляющие ее прямую и рассеянную**

## **Technique for separation of total irradiance into direct and diffuse components**

Зуев С. В.

[zuev@imces.ru](mailto:zuev@imces.ru)

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055, г. Томск,  
пр. Академический, д. 10/3